

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra automatizační techniky a řízení

# **Synchronizace vícezdrojových procesů na sítích**

## **Synchronization of multiple source processes on networks**

Disertační práce

Studijní program:	P2346 Strojní inženýrství
Studijní obor:	3902V056 Řízení strojů a procesů
Školitel:	prof. Ing. Radim Farana, CSc., FEng.
Doktorand:	Ing. Filip Lorenz

Ostrava, 2020

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Českých Budějovicích dne 19.8.2020

podpis

## **Poděkování**

Touto formou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé disertační práce panu prof. Ing. Radimu Faranovi, CSc., FEng., který mi věnoval svůj čas a nezlomil nade mnou hůl i přes značnou dobu, kterou jsem doktorskému studiu věnoval.

Dále bych chtěl tímto poděkovat také panu doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D., za poskytnutí neocenitelných rad a pomoc v průběhu doktorského studia.

## **Anotace disertační práce:**

Lorenz, Filip.

*Synchronizace vícezdrojových procesů na sítích*, Katedra automatizační techniky a řízení, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 110 stran, 18 obrázků, 9 tabulek, 1 příloha. Školitel: prof. Ing. Radim Farana, CSc., FEng.

---

Disertační práce se zabývá koordinací transportních procesů, konkrétně jde o jejich synchronizaci v koordinačních uzlech sítě a v uzlech vhodných pro křižování. Základní rozhodovací problém spočívá v navázání transportních procesů v koordinačních uzlech a nalezení vhodného místa pro křižování na transportní cestě tak, aby byla minimalizována časová ztráta přepravovaných elementů a zachována plynulost transportních procesů.

Matematický model je validován a verifikován na reálných vstupních datech železniční sítě na území Jihočeského kraje. Optimalizační úloha je řešena metodami matematického programování. Výpočetní experimenty byly realizovány v optimalizačním software Xpress – IVE.

Na základě dosažených výstupů je zřejmé, že matematický model je funkční a dosahuje výsledků, které je možno prohlásit za relevantní.

## Annotation of Dissertation Thesis:

Lorenz, Filip. *Synchronization of multiple source processes on networks*, Department of controls systems and instrumentation, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-TU Ostrava, 110 pages, 18 figures, 9 tables, 1 supplement.  
Tutor: prof. Ing. Radim Farana, CSc., FEng.

---

Dissertation thesis deals with coordination of transport processes, specifically, it is about their synchronization in coordination nodes of a network and in nodes suitable for passing the processes each other. The basic decision problem consists of defining transport processes in the coordination nodes and finding a suitable place for passing the processes each other on the transport route so that the time loss of transported elements is minimized, and the smoothness of transport processes is achieved.

The mathematical model is validated and verified on real input data of the railway network in the South Bohemian Region. The optimization problem is solved by methods of mathematical programming. Computational experiments were performed in the optimization software Xpress - IVE.

It is clear that the mathematical model is functional and provides results that can be considered relevant, based on the achieved outputs

## Obsah

Seznam použitého značení, symbolů a zkratk .....	8
1 Úvod .....	11
2 Obecná charakteristika procesů a jejich kategorizace .....	13
3 Analýza současného stavu řešené problematiky .....	17
3.1 Analýza současného stavu poznání v České republice a Slovenské republice.....	18
3.2 Analýza současného stavu poznání mimo Českou republiku a Slovenskou republiku .....	24
3.3 Shrnutí současného stavu řešené problematiky .....	29
3.4 Optimalizační metody .....	30
3.4.1 Simplexová metoda .....	30
3.4.2 Metoda větví a mezí (Branch and Bound algorithm) .....	33
3.5 Softwarová podpora optimalizačních metod .....	35
4 Cíle disertační práce .....	38
5 Matematický model.....	39
5.1 Formulace problému.....	40
5.2 Návrh matematického modelu.....	42
6 Výpočetní experimenty .....	46
6.1 Železniční síť pro validaci matematického modelu (soubor tratí Šumava).....	49
6.2 Popis uzlů železniční sítě (železniční stanice).....	51
6.2.1 Uzly, ve kterých dochází ke koordinaci vlakových spojů .....	52
6.2.2 Uzly, ve kterých může dojít ke křižování vlakových spojů na trati 198 .....	59
6.2.3 Uzly, ve kterých může dojít ke křižování vlakových spojů na trati 197 .....	60
6.2.4 Uzly, ve kterých může dojít ke křižování vlakových spojů na trati 194 .....	61
6.3 Přestupní doby.....	63
6.4 Seznam transportních procesu (vlakových spojů).....	65
7 Zhodnocení dosažených výsledků a diskuse .....	77
8 Možnosti uplatnění matematických metod a inženýrských nástrojů v operativním řízení technologických procesů .....	80
9 Shrnutí přínosů disertační práce pro rozvoj vědního oboru .....	86
10 Shrnutí přínosů disertační práce pro praxi.....	87
11 Možnosti pokračování v řešení dané problematiky.....	89
12 Závěr.....	91
13 Summary of the benefits of the dissertation thesis for the development of the field of science	93
14 Summary of the benefits of the dissertation thesis for practice.....	95
15 Possibilities of further solution of the given problem .....	97
16 Conclusion of the Dissertation Thesis .....	99

17	Použitá literatura.....	101
18	Seznam publikací vytvořených v rámci doktorského studia .....	105
18.1	Seznam publikací s přímým vztahem k tématu disertační práce .....	105
18.2	Seznam ostatních publikací .....	106
	Seznam tabulek.....	107
	Seznam obrázků .....	108
	Seznam příloh.....	109
	Příloha č. 1.....	110

## Seznam použitého značení, symbolů a zkratk

ZNAČKA	VÝZNAM	JEDNOTKA
$A$	incidenční matice	
$A$	matice s plnou řádkovou hodnotí	
$a_{ij}$	prvek incidenční matice	
$a_i$	maximální dovolený posun spoje $i \in I$	min.
$b_j$	maximální dovolený posun spoje $j \in J$	min.
CP	Connection Protection (Ochrana připojení)	
$D$	množina uzlů, ve kterých může dojít ke křížování transportních procesů	
DOZ	dálkově ovládané zabezpečovací zařízení	
$f$	účelová funkce	
$f_i$	intenzita cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$	
GVD	grafikon vlakové dopravy	
GWTR	GW Train Regio a.s. (provozovatel železniční dopravy)	
$h_i$	časová ztráta přestupujícího cestujícího přijíždějícího do přestupního uzlu spojem $i \in I$	min.
$h_{ijsk}$	nezáporná proměnná modelující časovou ztrátu přepravovaných elementů, které přijeli do koordinačního uzlu $k \in K$ transportním procesem $i \in I_k^P$ a přestupují na transportní proces $j \in J_{sk}$ odjíždějícím do směru $s \in S_k$	min.
$I$	množina přijíždějících spojů	
$I_k^P$	množina transportních procesů přijíždějících do uzlu	
$I^{GW}$	množina transportních procesů provozovaných na síti	
$I^{CA}$	množina procesů, které jsou koordinovány v krajních uzlech sítě	
$I_k^{CA}$	množina transportních procesů externích dopravců	
$I_{m+1}$	jednotková podmatice obsahující nultý účelový sloupec a vybrané sloupce	
$J$	množina odjíždějících spojů	
$J_{sk}$	množina transportních procesů odjíždějících z uzlu	
JOP	jednotné obslužné pracoviště	
JŘ	jízdní řád	
KJŘ	knižní jízdní řád	
$K$	množina uzlů, ve kterých je plánována změna transportních procesů přepravovaných elementů	
$K^G, K^C$	podmnožiny množiny $K$	
$K^V$	množina výchozích uzlů transportních procesů	



$K_i$	množina uzlů, ve kterých se bude přestupovat	
MU	mimořádná událost	
MHD	městská hromadná doprava	
Mosel	programovací jazyk	
$m$	počet nenulových složek vektoru $\mathbf{x}_0$ (počet řádků matice $A$ )	
$m_{ijd}$	bivalentní proměnná modelující naplánování křižování protisměrných transportních procesů $i \in I_d$ a $j \in I_d$ , $a_{ij} = 1$ v uzlu $d \in D$	
$N$	maximální dovolený posun	min.
$n_k$	počet transportních procesů odjíždějících z výchozího uzlu	
os. n.	osobní nádraží	
$Př(D)$	množinu přípustných řešení úlohy $D$	
PMD	posun mezi dopravními	
$q_{ijd}$	nezáporná proměnná modelující časovou ztrátu při křižování protisměrných transportních procesů $i \in I_d$ a $j \in I_d$ , $a_{ij} = 1$ v uzlu $d \in D$	min.
$R_0^+$	množina nezáporných čísel	
RB	radioblok	
$S_k$	množina směrů, do kterých transportní procesy odjíždějí	
SŽ (dříve SŽDC)	Správa železnic, státní organizace (dříve Správa železniční dopravní cesty)	
$TAKT$	symbol pravidelného intervalu	
$T$	prohibitivní konstanta	
$T_i^{odj}$	nejdříve možný čas odjezdu z výchozího uzlu	min.
$t_k^{prest}$	minimální nutná přestupní doba	min.
$t_{pres}$	přestupní doba	min.
$t_{pi}$	nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$	min.
$t_{oj}$	nejdříve možný čas odjezdu spoje $j \in J$	min.
$t_{ik}$	doba jízdy z výchozího uzlu transportního procesu do přestupního uzlu $k \in K_i$	min.
$t_p$	celková doba přemístění	min.
$t_1$	doba chůze od zdroje přemístění k zastávce	min.
$t_{\xi}$	doba čekání na spoj	min.
$t_{dp}$	doba pobytu v dopravním prostředku (doba přepravy)	min.
$t_{př}$	doba přestupu (včetně doby čekání na přestupních uzlech)	min.
$t_2$	doba chůze od zastávky k cíli přemístění	min.

Xpress - IVE	solver	
$x_i$	nezáporná proměnná modelující časový posun odjezdu transportního procesu $i \in I$ z výchozího uzlu	min.
$x_B$	hodnoty bazických proměnných	
$x_N$	vektor nebázických proměnných	
$x_0$	vektor, bazické řešení	
$x_i$	časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$ [min.]	min.
$y_j$	časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$ [min.]	min.
$Z_0^+$	množina nezáporných celých čísel	
$z_{ij}$	proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem $i \in I$ a odjíždějícím spojem $j \in J$	
$z_{ijsk}$	bivalentní proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi transportním procesem $i \in I_k^p$ a transportním procesem $j \in J_{sk}$ odjíždějícím do směru $s \in S_k$ v uzlu $k \in K$	
ŽST	železniční stanice	
$\tau_{id}$	doba jízdy z výchozího uzlu do uzlu $d \in D_i$	min.

# 1 Úvod

Pro určité typy transportních systémů je charakteristické, že přepravní elementy využívají ke své přepravě určité technické prostředky pohybující se po předem definovaných transportních trasách, přičemž v průběhu přepravy může docházet ke změně technického prostředku i transportní trasy. Při změně technického prostředku a transportní trasy bývá pro transportní systémy často základním hodnotícím kritériem jejich efektivity plynulost. Plynulost přepravy elementů, které v průběhu přepravy mění technický prostředek i transportní trasu může být zvyšována především vzájemnou časovou koordinací okamžiků přechodu elementu mezi technickými prostředky a transportními trasami.

Časová koordinace transportních procesů je založena na principu návrhu takových časových poloh realizace transportních procesů na transportních trasách, aby neproduktivní čas doprovázející změnu technického prostředku i transportní trasy byl co možná nejvíce eliminován a samotná přepravní doba o tuto neproduktivní dobu nerostla více, než je nezbytně nutné.

V případě, že je časový harmonogram vytvořen správně, má za důsledek zvýšení atraktivity celého transportního procesu, což vede ke zvýšení poptávky po tomto způsobu zajištění přepravy. Nedílnou součástí je poté zvýšení ekonomické efektivity realizovaného procesu. Pokud by ovšem došlo k situaci opačné, tedy časový harmonogram je vytvořen nesprávně, může v krajních případech dojít k situaci, že celý přepravní proces přestane být realizován na základě nízké nebo vůbec žádné poptávky.

V dnešní době, kdy je kladen důraz na to, aby procesy probíhaly efektivně, stále existují činnosti, které jsou tvořeny lidmi na základě jejich znalostí a zkušeností. V tomto případě se jedná o tvorbu časového harmonogramu transportních procesů. Jde o rozhodovací proces, při němž konstruktér navrhne časovou polohu transportního procesu. Pro tuto činnost nejenže konstruktér nemá nástroj pro její automatické provádění, ale ani možnost ověření, zda návrh, kterého dosáhl, je natolik kvalitní, aby jej mohl prohlásit za efektivní, či dokonce za optimální.

Disertační práce si klade za cíl vytvořit nástroj pro automatickou tvorbu časového harmonogramu transportních procesů a tím přispět k rozvoji podpůrných nástrojů v této problematice. Cílem je navrhnout smysluplná optimalizační kritéria na základě možností transportních sítí a transportních procesů.

Předložená disertační práce se zabývá tímto problémem především na úrovni dlouhodobějšího plánování, v minoritním podílu také operativního řízení.

## 2 Obecná charakteristika procesů a jejich kategorizace

Proces je v nejobecnější podobě dle EN ISO 9000:2000 [1] definován jako „soubor vzájemně souvisejících nebo vzájemně působících činností, který přeměňuje vstupy na výstupy“.

V reálném životě existuje celá řada různých druhů procesů. Můžeme hovořit o fyzikálních procesech, chemických procesech, výrobních procesech, administrativních procesech apod.

Pro některé z uvedených procesů je charakteristické, že probíhají na jednom místě, některé procesy mohou být doprovázeny změnou místa, tzn., že proces je zahájen na jednom místě a končí na místě jiném.

Příkladem druhu procesu probíhajícího na jednom místě je např. proces štěpení těžkých jader uranu probíhající v jaderném reaktoru za účelem výroby elektrické energie.

Příkladem druhu procesu, jehož charakteristickým rysem je změna místa jeho uskutečnění, jsou tzv. technologické procesy a zejména jejich podkategorie – transportní procesy. Transportní procesy se mohou ještě dále dělit – na hmotné a nehmotné.

Za hmotné transportní procesy se považují transportní procesy, které jsou nedílnou součástí výrobních (zpracovatelských) procesů, kdy proces výroby nemůže proběhnout na jednom místě. Hmotné transportní procesy označujeme zkráceně také pojmem doprava.

Za nehmotné transportní procesy lze považovat transportní procesy, které zajišťují přemístění elektronických informací (elektronická pošta), finanční toky (bezhotovostní platební styk) apod.

České terminologické prostředí (dle ČSN EN 13816) vykazuje jedno zásadní terminologické specifikum – rozlišuje významově dva pojmy doprava a přeprava. Protože oba pojmy mají různý význam, resp. používají se správně v odlišných situacích, je vhodné oba pojmy alespoň rámcově definovat.

Dopravou se rozumí pohyb dopravních prostředků po dopravních cestách.

Přepravou potom výsledný produkt dopravy, tj. přemístění osob a zásilek v prostoru a čase.

Uvedené definice jsou uvedeny spíše jen jako okrajové, pro níže uvedený text disertační práce není takovéto rozlišování zásadním způsobem podstatné.

Z hlediska dalšího textu disertační práce je podstatná určitá podskupina procesů, a to hmotné transportní procesy, které lze rozdělit na spojitě (kontinuální) a diskrétní.

Kontinuální transportní procesy se vyskytují zejména v produktovodech (plynovody, ropovody) a týkají se organizace toku určitých médií, které jsou předmětem přepravy. Diskrétní transportní procesy jsou potom všechny ostatní, předmět přepravy je zpravidla přepravován v určitém prostředí (obalu, dopravním prostředku), přičemž tok předmětu přepravy v určitém profilu trasy se uskutečňuje přerušovaně.

Co se týče nákladní dopravy, mohou se transportní procesy vyskytovat v různých odvětvích, od těžby surovin, přes výrobu, až po distribuci. Co se týče osobní, ale i nákladní dopravy, je příkladem transportního procesu např. jízda dopravního prostředku obsazeného osobami nebo loženého zásilkami (nákladem) z místa jejich nástupu (odeslání) do místa výstupu (určení).

Předmětem předložené disertační práce bude synchronizace určité kategorie hmotných transportních procesů, označovaných v intencích výše uvedené kategorizace jako doprava. Pro lepší názornost si lze pod pojmem transportní síť představit železniční síť na určitém území a pod pojmem transportní proces si představit např. jízdu vlaku mezi určenými dvěma místy na této železniční síti. Synchronizačním procesem bude v takovém případě časová koordinace spojů v přestupních uzlech.

Uvedené transportní procesy mohou být koncipovány jako jednofázové nebo vícefázové. Jednofázovým procesem bude chápána situace, kdy element v průběhu přemístění nemění technický prostředek a trasu, vícefázový proces bude charakterizován změnou technického prostředku, trasy nebo obojího. U více fázových procesů se kromě kritéria nákladovosti apod., významně zohledňuje také kritérium plynulosti procesu. Za plynulý proces bude možno považovat proces, při kterém nevznikají zbytečně velké časové prodlevy při změně technického prostředku anebo transportní trasy. Jedním z důležitých hledisek bude i hledisko časové, které bude v disertační práci hrát klíčovou roli.

Souhrn činností uvnitř dopravního systému souvisejících se zajištěním přemístění z místa vstupu do transportního systému, do místa, které je nejbližší cíli. Vstupem do procesu je požadavek na přemístění uživatele v prostoru a čase. Výsledkem je přemístění systémem v prostoru a čase odvozeného od jeho primárních požadavků.

Specifika modelovaného procesu vycházejí z definice procesu, který byl charakterizován pro disertační práci, tedy synchronizace jeho fází, která probíhá na určených místech, která jsou pro tuto synchronizaci vhodná.

Transportní procesy, které budou předmětem řešení v disertační práci, vykazují následující technologická specifika:

- síťovost,
- vícezdrojovost,
- diskrétnost,
- periodičnost,
- vícefázovost,
- neurčitost z pohledu predikce.

#### *Síťový charakter transportních procesů*

Síťový charakter procesů znamená, že se transportní procesy uskutečňují v rámci tzv. sítí, což jsou matematické struktury dobře reprezentované s využitím prostředků nazývaných grafy. U těchto grafů se v podmínkách disertační práce bude uvažovat, že budou obyčejné, neorientované a hranově ohodnocené, přičemž vrcholy budou reprezentovat místa potenciálního vzniku nebo ukončení transportního procesu, hrany budou reprezentovat úseky, po kterých se budou pohybovat technické prostředky přepravující elementy, a ohodnocení hran bude reprezentovat nenulové doby přepravy technických prostředků mezi vrcholy grafu. Na dané transportní síti bude definována množina transportních tras, po kterých se pohybují určené technické prostředky, přičemž bude dále platit, že každý úsek transportní sítě bude součástí alespoň jedné transportní trasy. Bude rovněž uvažováno s tím, že každou transportní trasu obsluhuje jeden typ transportního prostředku, který se v průběhu plánovacího období nemění a dále, že na každém úseku bude doba potřebná k jeho překonání stejná pro všechny typy technických prostředků obsluhujících daný úsek a bude rovněž uvažováno s tím, že doby přemístění mezi jednotlivými vrcholy se v průběhu plánovacího období nebudou měnit.

#### *Vícezdrojovost transportních procesů*

To, že je proces vícezdrojový, znamená, že požadavek na přepravu může vznikat současně v různých místech transportní sítě, konkrétně ve vrcholu.

### *Diskrétnost transportních procesů*

Diskrétnost procesu je nutno chápat především z hlediska časového, což znamená, že mezi realizací dvou po sobě jdoucích transportních procesů na stejné trase uplyne určitý nenulový čas.

### *Periodičnost transportních procesů*

Skutečnost, že je proces periodický, znamená pro potřeby řešení disertační práce, že mezi dvěma po sobě jdoucími realizacemi transportního procesu uplyne vždy stejný časový interval. Periodičnost je vyvolána tím, že technické prostředky mají na transportních trasách určitou oběžnou dobu, která je vyvolána potřebou přemístění prostředku z jednoho koncového (tzv. výchozího) místa transportní trasy do druhého koncového (tzv. cílového) místa transportní trasy a potřebou jeho přemístění zpět.

### *Vícefázovost transportních procesů*

Skutečnost, že je proces vícefázový, znamená pro potřeby řešení disertační práce, že v určitých místech na předpokládané trase dochází k přerušení transportního procesu z důvodu změny transportního prostředí. V oblasti hmotných transportních procesů je vícefázovým procesem proces, při kterém mezi místy vstupu a výstupu osoby nebo místem odeslání a určení zásilky do/z dopravního systému dochází k přestupu osoby nebo k překládce zásilek mezi dopravními prostředky stejného nebo různých druhů. Právě ve vícefázových transportních procesech hraje rozhodující roli požadavek na jejich synchronizaci.

### *Neurčitost predikce transportních procesů*

Neurčitost je determinována výskytem nepřesných vstupních dat v průběhu organizace procesu (např. různé váhy přestupních vazeb v přestupních uzlech, časové prodlevy dané provozními komplikacemi, apod.).



### 3 Analýza současného stavu řešené problematiky

Synchronizace vícezdrojových procesů v sítích je téma, jímž se zabývají výzkumní pracovníci nejen v České republice, ale také v zahraničí. Jedná se o téma aktuální, jež je předmětem řady výzkumných prací a článků. Lze předpokládat, že jeho význam bude narůstat s rostoucími požadavky na mobilitu, a především se zvyšujícím se tlakem na koordinaci jednotlivých druhů dopravy nejen v rámci integrovaných dopravních systémů. Dostupné analyzované výsledky se věnují řešenému tématu z mnoha různých úhlů pohledu, a to jak v obecné rovině (tedy nejen v dopravě), tak i s důrazem na dopravní síť. Pozornost při analýze současného stavu řešení problematiky byla soustředěna na ty výzkumné výsledky, jež mají spojitost se synchronizací procesů v oblasti dopravy, pochopitelně také na výsledky, které mají pro disertační práci největší přínos z hlediska tématu a kvality.

Analyzované výzkumné výsledky je možné pro větší přehlednost rozdělit ve smyslu jednotlivých druhů dopravy následovně:

- osobní doprava,
- nákladní doprava.

V osobní dopravě se jedná o interakci mezi jednotlivými druhy dopravy:

- železniční doprava – silniční doprava,
- autobusová doprava – tramvajová doprava,
- autobusová doprava – autobusová doprava,
- městská autobusová doprava – dálková autobusová doprava,
- atd.

Autoři obvykle využívají následující metody pro hledání optimálního nebo sub-optimálního řešení daného problému:

- lineární matematické modelování s různými optimalizačními kritérii,
  - s jednou účelovou funkcí s jednou i více optimalizovanými veličinami,
  - s více účelovými funkcemi reprezentujícími více kritérii,
- meta-heuristické metody,
- simulace.

Téma je obvykle řešeno ve vazbě na:

- hypotetickou dopravní síť, jež slouží k validaci výsledků použité metody řešení,
- skutečnou dopravní síť:
  - v rámci městské hromadné dopravy na ploše území nebo v přestupním uzlu,
  - s vazbami mezi příměstskou, meziměstskou a dálkovou dopravou v přestupním uzlu,
  - s koordinací časové polohy mezi spoji konkrétních vybraných linek.

Výzkum se v oblasti řešeného problému soustřeďuje primárně na osobní dopravu v intravilánu realizovanou jedním nebo více druhy dopravy, jejichž linky mají na trase nejméně jednu společnou zastávku – přestupní uzel.

V následujícím textu bude pozornost soustředěna na podrobnější zkoumání řešené problematiky na základě reprezentativního vzorku výzkumného materiálu pokrývajícího problematiku z pohledu všech výše uvedených aspektů. Různorodost jednotlivých přístupů, použitých metod a aktuálnost jejich řešení dostatečně pokrývá současný stav řešené problematiky.

### 3.1 Analýza současného stavu poznání v České republice a Slovenské republice

Základní přehled o možnostech využívání matematických přístupů pro řešení charakterizovaného typu optimalizačních úloh je možno najít v publikaci [2].

Tématem koordinace diskrétních transportních procesů v dopravních sítích obecnější rovině se zabývá publikace [3], na které následně navazují publikace [2] a [4].

Koordinace definovaných typů transportních procesů je v těchto publikacích zaměřena na místa v sítích, ve kterých se dané transportní procesy stýkají a ve kterých dochází k vzájemnému přechodu přepravovaných elementů mezi transportními procesy. Na problematiku časové koordinace uvedenou v publikaci [3] navázal v roce 2007 prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc., z Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline, který navrhl lineární matematický model pro izolovaný uzel transportní sítě, který umožňuje danou problematiku exaktně řešit s využitím lineárního matematického modelu.

Optimalizačním kritériem při uzlové koordinaci je v jeho modelu celková časová ztráta přepravovaných elementů při jejich přemísťování mezi koordinovanými procesy.

Zadání úlohy řešené s využitím modelu prof. Janáčka lze obecně zformulovat následujícím způsobem. V podmínkách izolovaného přestupního uzlu je definována množina příjíždějících spojů  $I$  (příjíždějících z více směrů) a množina odjíždějících spojů  $J$  odjíždějících vždy pouze do jednoho směru. Pro každý příjíždějící spoj  $i \in I$  je definován nejdříve možný čas jeho příjezdu do přestupního uzlu  $t_{pi}$ , maximální doba, ve které lze čas příjezdu posunout  $a_i$  a intenzita cestujících  $f_i$ , kteří v uzlu přestupují na odjíždějící spoje. Pro každý odjíždějící spoj  $j \in J$  je definován nejdříve možný čas jeho odjezdu z přestupního uzlu  $t_{oj}$  a maximální doba, ve které lze čas odjezdu posunout v čase  $b_j$ . Dále je známa přestupní doba  $t_{pres}$  (přestupní doba může být definována jednou hodnotou pro všechny spoje, nebo množinou hodnot, které zohledňují různé doby přestupů mezi jednotlivými spoji). Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých spojů tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta přestupujících cestujících. Symbol  $T$  reprezentuje prohibitivní konstantu, symbol  $R_0^+$  množinu nezáporných čísel a symbol  $Z_0^+$  množinu nezáporných celých čísel.

Rekapitulace označení veličin vyskytujících se v matematickém modelu, které mají charakter konstant:

$t_{pi}$	nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$ ,
$t_{oj}$	nejdříve možný čas odjezdu spoje $j \in J$ ,
$a_i$	maximální dovolený posun spoje $i \in I$ ,
$b_j$	maximální dovolený posun spoje $j \in J$ ,
$f_i$	intenzita cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$ ,
$t_{pres}$	přestupní doba,
$T$	prohibitivní konstanta.

Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých spojů tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta přestupujících cestujících.

Za účelem modelování rozhodnutí, která reprezentují požadované výstupní veličiny a vytvářejí logické vazby mezi nimi, zavádí prof. Janáček do modelu čtyři skupiny proměnných a to:

$x_i$	časový posun příjezdějího spoje $i \in I$ ,
$y_j$	časový posun odjezdějího spoje $j \in J$ ,
$z_{ij}$	proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi příjezdějším spojem $i \in I$ a odjezdějším spojem $j \in J$ ,
$h_i$	časová ztráta přestupujícího cestujícího příjezdějího do přestupního uzlu spojem $i \in I$ .

Z povahy definovaných rozhodnutí vyplývá, že proměnné  $x_i$ ,  $y_j$  a  $h_i$  budou mít jako definiční obor množinu nezáporných čísel (alternativně může být použit definiční obor – množina celých nezáporných čísel), pro proměnnou  $z_{ij}$  přichází v úvahu definiční obor – množina hodnot 0 a 1, přičemž z hlediska jednotlivých hodnot této proměnné bude platit, že když proměnná  $z_{ij} = 1$ , potom vazba mezi danou dvojicí spojů vzniká, když hodnota proměnné  $z_{ij} = 0$ , potom vazba mezi dvojicí spojů nevzniká.

Matematický model pro časovou koordinaci v přestupných uzlech má tvar:

$$\min f(x, y, z, h) = \sum_{i \in I} f_i h_i \quad (3.1)$$

za podmínek:

$$(t_{oj} + y_j) - (t_{pi} + x_i) - t_{pres} \geq T(z_{ij} - 1) \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (3.2)$$

$$(t_{oj} + y_j) - (t_{pi} + x_i) - t_{pres} \leq h_i + T(1 - z_{ij}) \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (3.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (3.5)$$

$$y_j \leq b_j \quad \text{pro } j \in J \quad (3.6)$$

$$x_i \in R_0^+ (x_i \in Z_0^+) \quad \text{pro } i \in I \quad (3.7)$$

$$y_j \in R_0^+ (y_j \in Z_0^+) \quad \text{pro } j \in J \quad (3.8)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (3.9)$$

$$h_i \in R_0^+ \quad (h_i \in Z_0^+) \quad \text{pro } i \in I \quad (3.10)$$

Funkce (3.1), reprezentuje optimalizační kritérium – celkovou časovou ztrátu všech cestujících přestupujících v daném přestupním uzlu. Hodnota intenzit přestupujících cestujících z jednotlivých příjíždějících spojů charakterizuje váhu jednotlivých přestupních vazeb.

Skupiny podmínek (3.2) a (3.3) jsou tzv. skupiny podmínek typu „buď anebo“. To znamená, že vždy je aktivní pouze jedna z nich a druhá je v této situaci splnitelná za všech okolností (tzn. při jakýchkoliv hodnotách proměnných). Skupina omezujících podmínek (3.2) je aktivní v situacích, kdy přestupní vazbu mezi spoji není možno vytvořit z důvodu toho, že přípojný spoj je z časového hlediska nedostupný, protože čas jeho odjezdu předchází časovému okamžiku, kdy je cestující (po přestupu) připraven k nástupu do vozidla. Uvažujme, že cestující přijel do uzlu spojem  $i \in I$  a navazující přípojný spoj spadá do množiny  $j \in J$ . Nastane-li situace, kdy čas odjezdu přípojného spoje  $j \in J$  předchází okamžiku, ve kterém je cestující příjíždějícím spojem  $i \in I$  připraven k nástupu do vozidla, je hodnota výrazu na levé straně příslušné omezující podmínky záporná a tato podmínka je splnitelná pouze v situaci, že příslušná vazební proměnná  $z_{ij} = 0$ . Je-li výraz na levé straně omezující podmínky (3.2) záporný, je záporný také výraz na levé straně omezující podmínky (3.3), protože levé strany obou v obou skupinách podmínek jsou stejné. Je-li levá strana omezující podmínky (3.3) záporná je tato podmínka splněna při jakékoliv kombinaci hodnot proměnných  $h_i$  a  $z_{ij}$ .

Skupina omezujících podmínek (3.3) je aktivní v situacích, kdy přestupní vazbu mezi spoji je možno vytvořit z důvodu toho, že přípojný spoj je z časového hlediska dostupný, protože čas odjezdu následuje po časovém okamžiku, kdy je cestující připraven k nástupu do vozidla. Uvažujme, že cestující přijel do uzlu spojem  $i \in I$  a navazující přípojný spoj spadá do množiny  $j \in J$ . Nastane-li situace, kdy čas odjezdu přípojného spoje  $j \in J$  následuje po okamžiku, ve kterém je cestující příjíždějícím spojem  $i \in I$  připraven k nástupu do vozidla (nebo nastane právě v tomto okamžiku), je hodnota výrazu na levé straně příslušné omezující podmínky nezáporná. Je-li tato hodnota kladná, je podmínka splnitelná dvěma způsoby. Prvním způsobem je její pokrytí kladné levé strany prostřednictvím hodnoty proměnné  $h_i$ , druhým způsobem je její pokrytí prostřednictvím výrazu  $T(1 - z_{ij})$ , když  $z_{ij} = 0$ .

Nastane-li pokrytí kladné levé strany prostřednictvím členu  $h_i$ , je zřejmé, že se to projeví v hodnotě účelové funkce, která proměnnou  $h_i$  obsahuje. Nastane-li pokrytí kladné hodnoty výrazem  $T(1 - z_{ij})$ , to je v situaci, kdy  $z_{ij} = 0$ , může  $h_i = 0$ , což je z hlediska hodnoty účelové funkce příznivý stav, protože hodnota účelové funkce se nezvyšuje (algoritmus hodnotu  $h_i = 0$  vzhledem ke zvolenému typu extrému preferuje). Protože bude docházet k preferenci tohoto způsobu pokrytí je evidentní, že je třeba nastavit pravidla optimalizace tak, aby vztažmo ke každému příjíždějícímu spoji  $i \in I$  nabyla proměnná  $z_{ij} = 1$ . Toho se dosáhne zařazením další skupiny podmínek (3.4). Ta zajistí požadovanou skutečnost.

V modelu při zařazení podmínky (3.4) řešení nastane situace, kdy hodnoty 1 nabude vždy ta proměnná  $z_{ij}$  vztahující se ke každému příjíždějícímu spoji, která vygeneruje nejnížší časovou ztrátu prostřednictvím proměnné  $h_i$ . Bude-li hodnota levé strany nulová, tzn., časová ztráta nevzniká, bude tato situace nejpriznivější, a tedy odpovídající proměnná  $z_{ij}$  bude pro tuto situaci rovna 1. Co se týče podmínky (3.2), ta je v případě nezáporné hodnoty výrazu na levé straně splnitelná jak při  $z_{ij} = 0$  tak i při  $z_{ij} = 1$ . Skupiny omezujících podmínek (3.5) a (3.6) zajistí, že posuny příjíždějících a odjíždějících spojů se uskuteční v povolených mezích.

Skupiny omezujících podmínek (3.7), (3.8), (3.9) a (3.10) vyjadřují definiční obory proměnných v řešené úloze.

Následně byla problematika časové koordinace diskrétních časových procesů systematicky řešena v závěrečných pracích zpracovávaných na Institutu dopravy, ve kterých byl exaktní model prof. Janáčka rozšířen o vybrané specifické podmínky železniční dopravy. Jedná se o diplomovou práci [5], bakalářskou práci [6] a diplomovou práci [7]. Řešená problematika má samozřejmě své opodstatnění u všech druhů dopravy, proto je žádoucí se zabývat také diplomovou prací [8].

K velkému počtu interakcí mezi jednotlivými spoji dochází v sítích s vysokým počtem spojů a přestupních vazeb mezi spoji, resp. linkami ve vztahu k velikosti řešeného území. Jedná se typicky o městskou a příměstskou hromadnou dopravu. Diplomové práce řešené na Institutu dopravy v letech 2013 – 2018 se zabývají časovou koordinací v různých dopravních systémech:

- Modely pro optimalizaci pravidelných jízdních řádů linek s uzavřeným oběhovým režimem a jednobodovou časovou koordinací [9],
- Časová koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku Opava [10],
- Optimalizace veřejné dopravy Rýmařovska [11],
- Časová koordinace spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou [12],
- Časová koordinace spojů v přestupním uzlu Ostrava – Dubina [13].

Kromě koordinace diskrétních transportních procesů v uzlech je možné realizovat také koordinaci daných typů procesů na společných úsecích. Pro tento případ koordinace jsou možné matematické přístupy publikovány v [3]. Navržené přístupy byly rovněž ověřovány na Institutu dopravy v rámci zadávaných závěrečných prací, přičemž namátkově lze uvést bakalářské a diplomové práce:

- Časová koordinace spojů v síti MHD Frýdek-Místek [14],
- Časová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy v úseku Frýdek-Místek - Dobrá. Ostrava [15],
- Časová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy v úseku Šumperk - Velké Losiny [16],

a dále disertační práci Síťová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy [17].

Výzkumný článek publikovaný v roce 2017 [18] se zabývá konkrétní existující přepravní relací. Jeho podstatou je koordinace jízdního řádů vlaků a autobusů, které v tomto případě obsluhují téměř totožné území.

Cílem článku je kvantifikovat úspory, které by vznikly eliminací vybraných spojů. Konkrétně jde o 3 varianty eliminace:

- varianta A: zrušení autobusových spojů, jež jedou v podobné časové poloze jako vlaky a zároveň zrušení nejméně vytižených vlakových spojů,
- varianta B: oproti variantě A jsou zachovány ty autobusové spoje, jež obsluhují obec Strečno,

- varianta C: eliminovány jsou všechny autobusové spoje jedoucí v podobné časové poloze jako vlaky.

V článku jsou vyčísleny konkrétní úspory v penězích a v dopravních výkonech, což může mít pozitivní dopad na efektivitu hospodaření státní a krajské a místní samosprávy. Tento efekt je velmi žádoucí.

Článek má pro předkládanou disertační práci především hodnotu v analytické části. Je velmi žádoucí posuzovat synchronizaci vícezdrojových procesů na sítích nejen z pohledu toho, že jízdní řád je fixně dán a nelze jej měnit. Žádoucí je rovněž analyzovat samotné jízdní řády spojů různých druhů dopravy z hlediska jejich kvality, souběhu spojů v čase a prostoru a potřebnosti jejich vzájemné koordinace. Výsledkem této analytické fáze může být, jak ukazuje zkoumaný článek, nepotřebnost některých spojů, čímž odpadá i nutnost jejich časové koordinace.

### 3.2 Analýza současného stavu poznání mimo Českou republiku a Slovenskou republiku

Mimo Českou republiku a Slovenskou republiku se časovou koordinací zabývá disertační práce [19]. Poměrně rozsáhlá práce se zabývá multimodálními dopravními sítěmi, jejichž jednotlivé spoje (linky) se protínají v přestupních terminálech a je zde tedy realizován přestup cestujících mezi spoji. Jako hlavní motivaci autor uvádí pro řešení problematiky nutnost atraktivnit hromadnou dopravu cestujícím prostřednictvím zefektivnění přestupních vazeb mezi spoji. K tématu přistupuje dvěma způsoby:

- koordinací spojů prostřednictvím úpravy jízdních řádů (Schedule Coordination),
- koordinaci spojů v reálném čase (Connection Protection).

Práce obsahuje optimalizační model pro generování jízdních řádů a minimalizaci přestupních časů mezi spoji v reálném čase. Cílem modelu je nalézt optimální jízdní řád prostřednictvím posunu existujících spojů do nové časové polohy a/nebo zdržením, tj. čekáním spoje na svůj přípoj tak, aby se minimalizovala celková doba zpoždění obou spojů. Model zohledňuje jak dobu čekání přestupujících cestujících, tak dobu zdržení u osob, které jedním z dvojice spojů cestují, ale přestupní vazbu nevyužívají. Model je validován prostřednictvím případových studií a jsou doloženy pozitivní výsledky konkrétními časovými úsporami. Autor dále dochází k závěru, že i když dojde k modifikaci jízdního řádu na základě výstupu matematického modelu, stále je třeba věnovat pozornost stochastickému charakteru dopravy, tedy vzniku mimořádných situací, zpoždění apod., které přestupní vazby naruší.



Proto je v rámci práce vyvinut také CP model (Connection Protection). Účelová funkce modelu zohledňuje pravděpodobnost realizace přestupních vazeb a optimalizuje náklady. Tento model je evaluován a porovnán s předchozími modely s cílem demonstrovat jej jako nástroj ke zlepšení efektivity přestupních vazeb a redukci čekacích dob cestujících.

Hlavním přínosem předložené disertační práce je poměrně inovativní přístup autora, který se nezabývá pouze řešením problematiky v koncepční fázi, tj. nastavení parametrů jízdních řádů, určení časových poloh spojů a přestupních vazeb, ale také koordinací spojů v reálném čase jako podpory pro operativní řízení. K optimalizaci rozhodování v reálném čase používá účelovou funkci minimalizující náklady vznikající při realizaci přestupních vazeb u zpožděných spojů.

Výzkumný článek [20] publikovaný v roce 2012 se koncentruje na přestupní vazby mezi vedlejší sítí hromadné dopravy ve městech (primárně autobusová doprava) a páteří dopravní sítí (metro, železnice). Cílem je vyvinout postup, který současně generuje jak trasy, tak frekvence (časové intervaly) ve sběrné autobusové síti a to tak, aby byl aplikovatelný na řešení problémů o velikosti odpovídající rozsahem reálným městům.

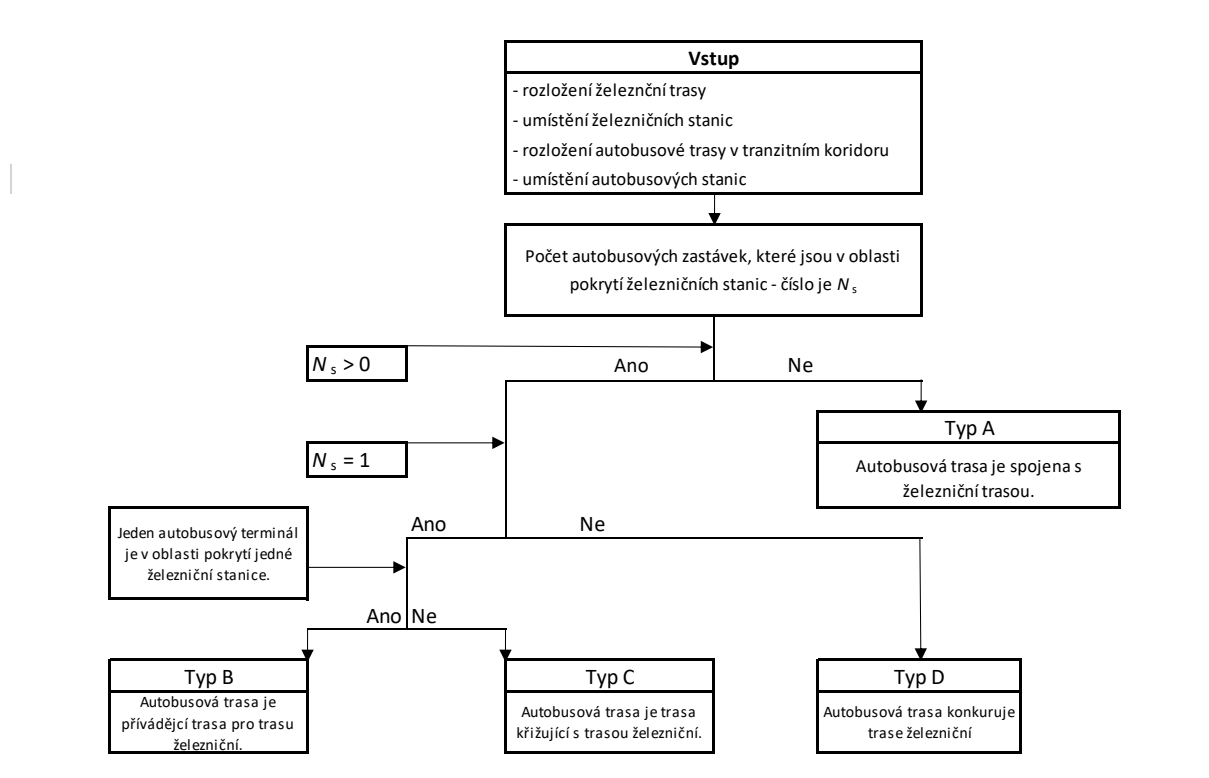
Algoritmus řešení je rozdělen do dvou fází:

1. pomocí heuristického algoritmu jsou generovány dvě různé, vzájemně kompatibilní, trasy linek (spojů) s cílem nalezení řešení, které by jednak maximalizovalo území obslužené navrženými trasami, a zároveň minimalizovalo celkový přepravní čas. První řešení tras spojů je koncipováno jako okružní linky na základě řešení úlohy obchodního cestujícího (Travelling Salesman Problem). Druhé řešení je sestaveno s cílem generovat „přímější“ linky na základě řešení úlohy hledání nejkratší trasy na síti (K-Shortest Path Algorithm).
2. výsledky fáze 1 slouží jako vstupní data pro fázi 2, v níž se hledá sub-optimální skupina linek při respektování intervalů mezi spoji z 1. fáze.

Navržený postup hledání řešení byl validován na síti měst Winnipeg (Kanada) a Řím (Itálie) s cílem porovnat výstupy z modelů s reálným stavem v dopravní síti. Autor uvádí, že se uvedeným přístupem podařilo nalézt takové řešení, které snižuje celkový cestovní čas, ovšem za cenu zvýšení počtu přestupů. Celkové náklady na provoz navržené dopravní sítě byly nižší než v reálných podmínkách.

Článek je pro řešenou disertační práci přínosný ve zvoleném přístupu autorů, který je sice relativně komplikovaný, obsahuje více fází a navíc počítá se zafixováním části dopravní sítě (vlaky, metro), ale uvedený postup byl validován na dopravní síti reálných měst s velkým počtem obyvatel a složitým dopravním systémem.

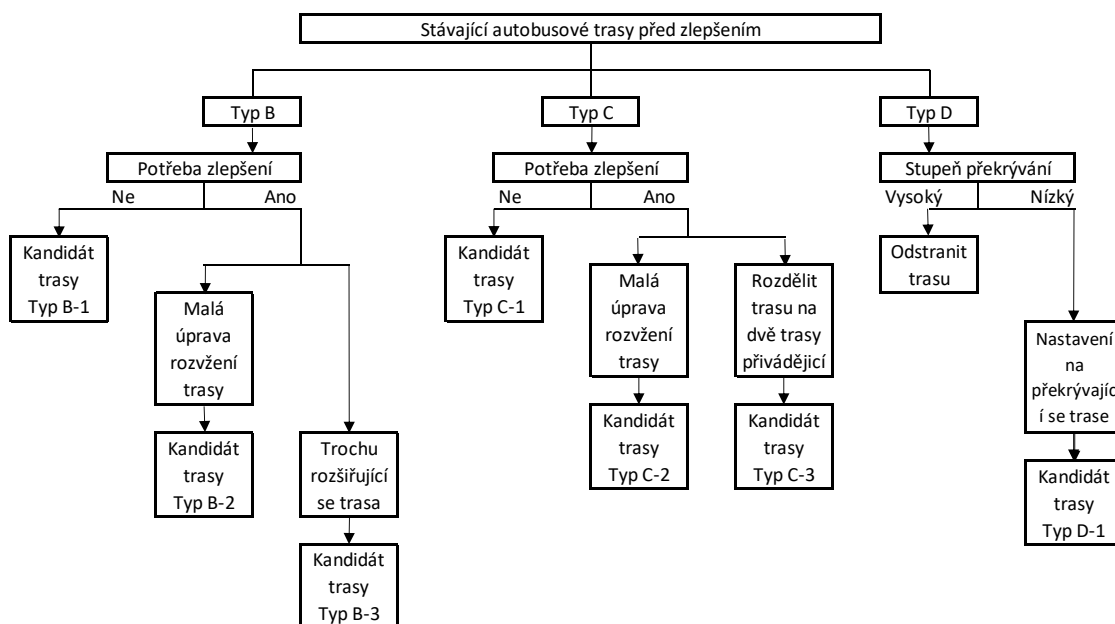
Článek [21] publikovaný v roce 2013 se zabývá klasifikací autobusových tras a jejich vztahu k páteční tranzitní (železniční) dopravou. Cílem navrhovaného řešení je maximalizovat využití tranzitní (železniční) dopravy cestujícími a optimalizovat stávající autobusové linky z pohledu jejich přínosu k tranzitní (železniční) dopravě. V rámci článku je vyvinut algoritmus, který s louží k definování vztahu autobusových linek k páteční tranzitní dopravě, viz obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Hierarchický vztah mezi autobusovými linkami a železniční linkou. [21]

Výstupy z tohoto algoritmu jsou použity v matematickém modelu, který se zabývá společnou optimalizací autobusových a železničních tras. Výstupem tohoto vícekritériálního matematického modelu je maximalizace využití kapacity železničních tras a minimalizace celkové doby cestování cestujících.

V neposlední řadě jsou dosažené výsledky použity v navazujícím genetickém algoritmu, jehož výsledky rozhodují o účelnosti jednotlivých autobusových tras a jejich možném zlepšení, viz obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Postup generování kandidátů autobusových linek. [21]

Validace a verifikace navrženého řešení byla ověřena na modelové síti s jednou tranzitní páteří linkou železniční a s několika autobusovými linkami.

Přístup autorů k řešenému tématu je inovativní z pohledu využití genetických algoritmů a více-fázového postupu. Článek je pro disertační práci přínosný z pohledu definování významnosti jednotlivých linek a jejich dopadu na řešený systém.

Ve výzkumné práci [22] se autoři, analogicky jako ve výše uvedených pracích, zabývají koordinací přestupních vazeb mezi jednotlivými tranzitními trasami v reálném čase. Uvědomují si výhody koordinovaných přestupů, tedy snížení doby čekání cestujících, ovšem zapracovávají taktéž:

- rizika zpoždění cestujících, kteří danou linkou cestují,
- cestujících, kteří danou linkou cestovat hodlají
- a hromadění dopravních prostředků v koordinovaných uzlech.

V první části autoři vyvinuli dynamickou strategii řízení, jež je založena na teorii řízení, a díky čemuž byla stanovena optimální strategie řízení (zdržení spojů v koordinovaných bodech). Maximální zdržení spoje je tedy dáno funkcí odhadů příjezdů jednotlivých spojů a cestujících v reálném čase a nejistoty v těchto odhadech.

V další části se autoři věnují tvorbě, validaci a verifikaci simulačního modelu. Simulační model slouží ke dvěma základním účelům:

1. k potvrzení analytických závěrů,
2. ke změnám hodnot parametrů majících přímý vliv na kontrolní schéma k dosažení různým stavům řešeného systému.

Dále se autoři zabývají také doplňkovými opatřeními, která mohou být nápomocna při koordinaci.

Prvním z těchto dílčích opatření je funkce v aplikacích pro chytré telefony, která uživatelům umožňuje sdílet své přepravní záměry se společnostmi, které přepravu zajišťují. V praxi tento systém funguje následujícím způsobem. Uživatel pomocí aplikace v chytrém telefonu předá dopravci informaci o realizaci změny dopravního prostředku (tedy, že má v úmyslu realizovat přestup) a na základě této informace je navazující spoj zdržen.

Druhým dílčím opatřením je vazba dopravních prostředků na dopravní infrastrukturu. V tomto případě je poloha vozidel sledována v reálném čase. V případě, kdy navazující dopravní prostředek (spoj) se blíží do místa koordinace, a tak jízda dopravního prostředku (spoje), ze kterého cestující přestupuje a je v rámci svého pravidelného jízdního řádu zpožděn, bude uspíšena pomocí zařízení řídících provoz na řešené infrastruktuře (na křižovatkách se stane směr jízdy dopravního prostředku prioritní).

Přínos pro disertační práci je v poměrně širokém rozsahu řešeného tématu, kdy se autoři nevěnují pouze striktně zajištění přestupních vazeb, ale také dopadům na všechny cestující pohybující se v řešeném systému. Dále je zde uvedena část pro inovativní přístupy sloužící ke zlepšení informačního toku mezi cestujícími a dopravci a též zvýšení efektivnosti infrastruktury podílející se na řízení.

Článek [23] se zabývá koordinací časového harmonogramu mezi linkou rychlého tranzitního autobusu (autobus, jehož četnost zastávek je nižší než u autobusů městské hromadné dopravy a má pro své jízdy vyhrazen speciální jízdní pruh) a autobusy městské hromadné dopravy v Pekingu. Autoři se koordinací těchto systémů zabývají z důvodu jejich rostoucího využití cestujícími a negativních dopadů na integrovanou veřejnou dopravu při nízké úrovni koordinace. V první části se autoři zaměřují na studium provozních charakteristik a stanovují optimalizační kritérium, kterým jsou celkové náklady na provoz systémů, do čehož taktéž započítávají celkovou přepravní dobu cestujících.

V další části je vytvořen model koordinovaného provozu. V poslední části se práce věnuje tvorbě a aplikaci genetického algoritmu na řešení koordinovaného provozu s cílem optimalizace hodnot stanovených kritérií.

Po aplikaci výše zmíněného genetického algoritmu byly dosaženy dva výsledky:

1. celkové náklady na provoz koordinovaných systémů byly sníženy na základě koordinace jednotlivých jízdních řádů,
2. celková doba čekání cestujících byla snížena na základě koordinace rychlých tranzitních autobusů a autobusů městské hromadné dopravy.

Cílem výzkumného projektu [24] je identifikace jednotlivých autobusových linek a jejich vzájemného vztahu z pohledu, zda jsou si autobusové linky konkurenční, doplňkové nebo nezávislé. Následně bylo rozhodováno o časových posunech jednotlivých autobusových linek, které obsluhovali jednotnou oblast na základě výpočtu cestovních nákladů cestujících, doby chůze a doby čekání pro každou jednotlivou autobusovou trasu. Dále se autoři zabývají taktéž chováním cestujících při volbě vhodných autobusových tras a výsledky dosažené průzkumem zapracovávají do řešení.

Přínosem pro disertační práci je definice jednotlivých autobusových tras na základě vypočtených statistických faktorů stanovených pro každou linku. Dále je zde bráno v potaz chování cestujících při výběru vhodného autobusového spoje.

Dostupné analyzované výsledky se pochopitelně věnují řešenému tématu z mnoha různých úhlů pohledu, a to jak ve smyslu jednotlivých druhů dopravy (osobní, nákladní doprava), tak jako interakce mezi jednotlivými druhy dopravy (železniční doprava – silniční doprava, autobusová doprava – tramvajová doprava, autobusová doprava – autobusová doprava, městská autobusová doprava – dálková autobusová doprava atd.).

### 3.3 Shrnutí současného stavu řešení problematiky

Synchronizace vícezdrojových procesů na sítích je autory z celého světa řešena jak metodami simulace, tak lineárního matematického modelování. Významný přínos pro práci má lineární matematický model pro izolovaný uzel transportní sítě prof. Jaroslava Janáčka s optimalizačním kritériem, kterým je celková časová ztráta přepravovaných elementů při jejich přemístování mezi koordinovanými procesy. Ze zahraničních zdrojů má největší význam disertační práce [19], která se zabývá časovou koordinací v reálném čase.

## 3.4 Optimalizační metody

### 3.4.1 Simplexová metoda

Pro řešení úloh spojitého lineárního programování se používá simplexová metoda [25]. Její princip spočívá v řešení soustavy lineárních rovnic v tzv. kanonickém tvaru. Významnou úlohu při řešení lineárních matematických modelů hrají bazická řešení.

Úloha lineárního programování je v kanonickém tvaru, jestliže je vyjádřena následovně [26]:

$$\begin{aligned} \max \quad & \mathbf{c} \cdot \mathbf{x} \quad \text{pro} \\ & A \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

Matice  $A$  má plnou řádkovou hodnost. První krok postupu vedoucího k použití simplexové metody k nalezení optimálního řešení spočívá v převedení úlohy ze základního tvaru  $\max \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}$  pro  $A' \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ ,  $\mathbf{x} \geq 0$  do kanonického tvaru.

Ke každé levé straně  $i$ -té nerovnosti přidáme doplňkovou proměnnou  $x'_i \geq 0$ , čímž dosáhneme převedení všech nerovností na rovnosti následovně:

$$a_{i1} \cdot x_1 + \dots + a_{in} \cdot x_n \leq b_i \quad \rightarrow \quad a_{i1} \cdot x_1 + \dots + a_{in} \cdot x_n + x'_i = b_i$$

Bazickým řešením rozumíme vektor  $\mathbf{x}_0$ , který splňuje podmínku  $A \cdot \mathbf{x}_0 = \mathbf{b}$  a zároveň má nejvýše  $m$  nenulových složek, kde  $m$  je počet řádků matice  $A$ . Nenulové složky vektoru  $\mathbf{x}_0$  odpovídají nezávislým sloupcům matice  $A$ , které se nazývají bází řešení  $\mathbf{x}_0$  a tvoří podmatici  $A_1$ . Jestliže má bazické řešení  $\mathbf{x}_0$  právě  $m$  nenulových složek, pak je báze pro  $\mathbf{x}_0$  určena jednoznačně. Pokud má  $\mathbf{x}_0$  méně než  $m$  nenulových složek, pak toto řešení nazýváme degenerované.

Další krok spočívá v převedení úlohy z kanonického tvaru do ekvivalentního redukovaného zápisu s použitím pomocné proměnné  $x_0$ , která se vyskytuje pouze v nultém tzv. účelovém řádku podmínek úlohy.

$$\begin{aligned} \max \quad & x_0 \\ & x_0 + \mathbf{c} \cdot \mathbf{x} = 0 \\ & A \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

K zobrazení redukovaného zápisu kánonického tvaru úlohy lineárního programování používáme simplexovou tabulku, jež vypadá následovně:

1	$c_1$	$c_2$	...	$c_n$	$-b_0$
0	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1n}$	$b_1$
0	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2n}$	$b_2$
...	...	...	...	...	...
0	$a_{m1}$	$a_{m2}$	...	$a_{mn}$	$b_m$

Simplexová tabulka zapisuje koeficienty soustavy lineárních rovnic, což vyjádříme maticově takto:

$$\begin{pmatrix} 1 & \mathbf{c} \\ \mathbf{0} & A \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ \mathbf{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b_0 \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$$

Nultý řádek a sloupec tabulky se nazývá účelový řádek a sloupec.

Necht'  $C = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{c} \\ \mathbf{0} & A \end{pmatrix}$  a  $C_1$  je její regulární podmaticí obsahující sloupce podmatice  $A_1$  a nultý sloupec, pak hodnoty bázeických proměnných  $\mathbf{x}_B$  a jejich účelová hodnota  $-x_0$  jsou určeny vztahem  $\begin{pmatrix} x_0 \\ \mathbf{x}_B \end{pmatrix} = C_1^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -b_0 \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$ . Standardními řádkovými operacemi v simplexové tabulce můžeme postupně vyjadřovat jednotlivá bazická řešení úlohy včetně účelových hodnot.

Následujícím krokem je převedení simplexové tabulky do jednotkového tvaru, pro který platí, že v simplexové tabulce je vyznačena jednotková podmatice  $I_{m+1}$  obsahující nultý účelový sloupec a vybrané sloupce matice  $A$ . Simplexová tabulka je zároveň přípustná, jestliže poslední sloupec má mimo nultého řádku nezáporné hodnoty.

Rozdělme si vektor proměnných  $\mathbf{x}$  na bázeické složky  $\mathbf{x}_B$  a nebázeické složky  $\mathbf{x}_N$ . Nebázeická složka  $\mathbf{x}_N$  vektoru proměnných  $\mathbf{x}$  odpovídá nulovým proměnným. Pro zvolené nebázeické hodnoty  $\mathbf{x}_N \geq 0$  jsou odpovídající bázeické proměnné určeny vztahy:

$$\mathbf{x}_B = \mathbf{b}' - \mathbf{A}'_N \cdot \mathbf{x}_N$$

$$b'_0 + \mathbf{c}'_N \cdot \mathbf{x}_N$$

Mějme pro danou úlohu lineárního programování zápis simplexovou tabulkou v jednotkovém tvaru:

$$T = \left[ \begin{array}{cc|c} 1 & \mathbf{c}' & -b'_0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}' & \mathbf{b}' \end{array} \right]$$

Pak složky vektoru  $\mathbf{b}'$  vyjadřují hodnoty bazických proměnných  $\mathbf{x}_B$  příslušného bazického řešení a  $b'_0$  je účelovou hodnotou tohoto řešení.

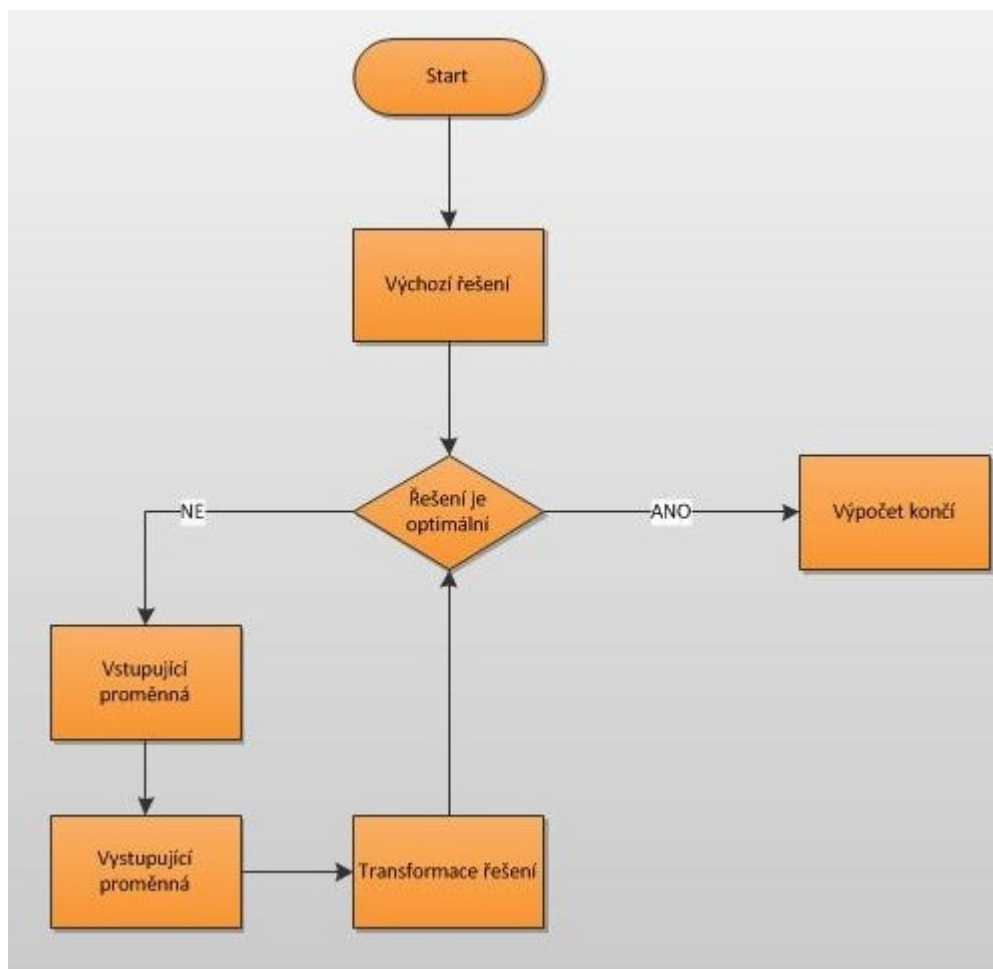
Pokud v simplexové tabulce platí  $\mathbf{c} \geq 0$ , pak vyjádřené bazické řešení  $\mathbf{x}_B = \mathbf{b}'$ ,  $\mathbf{x}_N = 0$  je optimálním řešením úlohy.

Simplexová metoda může skončit s následujícími výsledky [27]:

- neexistuje přípustné řešení,
- existuje právě jedno optimální řešení,
- existuje nekonečně mnoho optimálních řešení, pokud má účelová funkce stejnou směrnici jako podmínka, kterou poslední bazické řešení splňuje jako rovnost,
- existuje nekonečně mnoho přípustných řešení, tedy optimální řešení není možné najít, když je množina přípustných řešení neomezená ve směru optimalizace.

Algoritmus simplexové metody je zobrazen na obrázku 3.3.





Obrázek 3.3: Algoritmus simplexové metody. [28]

### 3.4.2 Metoda větví a mezí (Branch and Bound algorithm)

Metoda větví a mezí je obecnou metodou, která slouží k řešení optimalizačních úloh. Její použití je možné jak pro úlohy celočíselného programování, tak i pro úlohy, které s lineárním programováním nesouvisí [29].

Mějme množinu přípustných řešení úlohy  $D$ , jež je označena symbolem  $Př(D)$ . Optimalizační úlohu  $D$  s účelovou funkcí  $f$  řešíme tak, že vytvoříme podúlohy  $D_1; \dots; D_n$  se stejnou účelovou funkcí takové, že

$$Př(D) = Př(D_1) \cup Př(D_2) \cup \dots \cup Př(D_n).$$

Optimální řešení úlohy  $D$  bude získáno tak, že se vybereme nejlepší ze všech optimálních řešení podúloh  $D_1; \dots; D_n$ . V průběhu řešení je cílem, aby podúlohy  $D_1; \dots; D_n$  byly méně rozsáhlé a tedy rychleji a snadněji řešitelné, než původní úloha  $D$ . Nalezení optimálního řešení úlohy  $D$  je snadné, pokud pro každou podúlohu  $D_i$ :

1. buď najdeme optimální řešení úlohy  $D_i$ ,
2. nebo prokážeme, že úloha  $D_i$  nemá žádné přípustné řešení,
3. nebo prokážeme, že žádné přípustné řešení úlohy  $D_i$  není lepší než libovolné známé přípustné řešení úlohy  $D$ .

Pokud pro některou podúlohu nejsme schopni rychle zjistit ani jednu z uvedených vlastností, potom pro každou takovou podúlohu  $D_i$  použijeme stejný postup jako pro úlohu  $D$ , tj. rozvětvíme ji na podúlohy  $D_{i1}; \dots; D_{im}$  a pro takto získané podúlohy se opět snažíme zjistit některou z výše uvedených vlastností. Jednotlivé podúlohy můžeme pokládat za vrcholy kořenového stromu, který nazýváme stromem řešení. Kořenem je výchozí úloha  $D$ . Z každé úlohy, která byla větvena na podúlohy, vedou hrany ke všem jejím podúlohám. Během výpočtu se strom řešení mění (rozšiřuje).

Pokud pro některou podúlohu  $D_i$  je zjištěno, že žádné přípustné řešení úlohy  $D_i$  není lepší než nějaké v té době již známé řešení úlohy  $D$ , není tuto podúlohu třeba větvit. Nejlepší dosud známé řešení úlohy  $D$  se během výpočtu obvykle mění (zlepšuje). Výpočet je uspořádán tak, že:

- Zachováváme dosud nejlepší známé řešení  $\bar{r}$  a hodnotu jeho účelové funkce  $L$ .
- Pro každou podúlohu  $D_i$  vypočteme horní (dolní) odhad účelové funkce pro maximalizační (minimalizační) úlohu. Platí, že žádné přípustné řešení úlohy  $D_i$  není lepší než tento odhad. Pokud horní odhad je menší (větší) než  $L$ , úloha  $D_i$  určitě neobsahuje optimální řešení a můžeme ji ze stromu řešení vypustit.
- Ze všech podúloh v stromu řešení vybereme úlohu s nejvyšším (nejnižším) horním odhadem a vykonáme její větvení. Obvyklým způsobem větvení u úloh 0-1 programování je fixování některé neceločíselné proměnné na 0 nebo na 1.

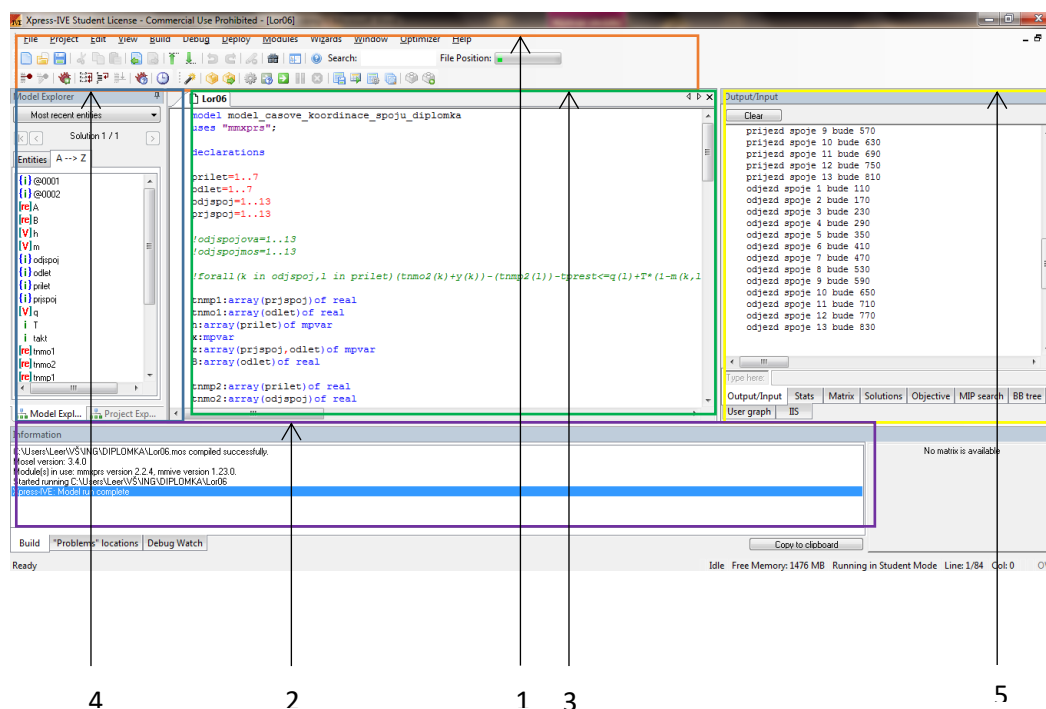
Výpočet končí v okamžiku, kdy u všech podúloh byla prokázána jedna z výše uvedených vlastností.

### 3.5 Softwarová podpora optimalizačních metod

Pro potřeby řešení optimalizačních úloh je k dispozici široké spektrum nástrojů, pomocí nichž lze řešit zadané problémy. Ať už to jsou simulační software pracující na principu diskrétní simulace, jako jsou software Witness a Simul8, nebo nástroje využívající vývojové prostředí, jakými jsou Delphi pracující na základě programovacího jazyka Object Pascal nebo Xpress – IVE využívající programovací jazyk Mosel.

Poslední zmiňovaný software byl vyvinut pro potřeby lineárního programování, přičemž neklade na řešitele vysoké nároky z hlediska programátorských schopností a dovedností. Xpress je k dispozici na všech běžných počítačových platformách. Tento software je schopen dále pomocí programového zápisu v C, C++, Java a dalších využívat API knihovnu.

Lineární matematický model řešený v disertační práci je zapsán v programovacím jazyku Mosel a dále je řešen v optimalizačním software Xpress – IVE [30]. Uvedený optimalizační software využívá k řešení matematického modelu simplexovou metodu a metodu větví a mezí současně z důvodu, že některé proměnné v modelu jsou celočíselné (bivalentní). Pomocí těchto metod je možné dosáhnout exaktního řešení. Pracovní prostředí softwaru Xpress – IVE, je znázorněno na Obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Pracovní prostředí softwaru Xpress – IVE s vyznačením jednotlivých částí pracovního prostředí. [autor]

Pracovní prostředí je rozděleno do pěti částí. První část (vymezenou polem 1) tvoří v horní části obrazovky umístěná lišta s nabídkou funkcí, přičemž dvojici nejdůležitějších funkcí tvoří tlačítka Compile a Run model.

Po kliknutí na tlačítko Compile se provede kompilace modelu a v případě výskytu syntaktické chyby v zápisu textu programu pomocí jazyka MOSEL je uživatel na tuto chybu upozorněn prostřednictvím barevného označení řádku, kde se vyskytuje chyba v zápisu textu programu a také v druhé části pracovního prostředí v dolní části obrazovky. Tuto část představuje samostatné okno (vymezené polem 2), ve kterém se po stlačení tlačítka Compile buď potvrdí správnost zápisu textu modelu, nebo je uživatel upozorněn v podobě zápisu identifikujícího polohu chyby v textu, které udává, jak číslo chyby a její polohu v daném řádku, tak i její typ. Samotný zápis textu programu se realizuje v třetí části pracovního prostředí (vymezeném polem 3), v prostředním okně. Všechny prvky použité v modelu se vypisují ve čtvrté části pracovního prostředí (vymezeném polem 4), nalevo od panelu se zápisem textu programu.

Po splnění všech náležitostí souvisejících s tvorbou textu programu (včetně odladění syntaktické správnosti textu programu) se stisknutím tlačítka Run model zahájí běh programu a obsahuje-li text programu požadavek na výpis řešení, zobrazí se tento výpis po ukončení optimalizačního výpočtu v páté části pracovního prostředí (vymezené polem 5), v okně napravo od okna obsahujícího zápis textu programu.

Text programu má předepsanou strukturu, která v nástroji Xpress – IVE musí být dodržena. Sestavení matematického modelu se řídí dle následujících kroků:

- 1) začátek modelu, jeho název a všeobecné nastavení,
- 2) nastavení parametrů,
- 3) deklarace (spočívá ve stanovení indexů, polí a rozhodovacích proměnných),
- 4) naplnění úlohy koeficienty modelu,
- 5) zápis účelové funkce, obligatorních a strukturálních podmínek,
- 6) příkaz optimalizace,
- 7) určení formy výstupů a jejich zápis,
- 8) ukončení modelu.

Body 1), 3), 5), 6) a 8) jsou pro sestavení jakéhokoliv matematického modelu povinné, statní výše zmíněné body nejsou při sestavě matematického modelu vyžadovány. Klíčová slova zapsaná v jazyku Mosel jsou vždy ve formě malých písmen.

Dle výše zmíněných bodů každý matematický model zapsaný v jazyku Mosel začíná klíčovým slovem model (bod 1) a končí příkazem end-model (bod 8). Všechny ostatní zápisy musí být vždy vně těchto dvou klíčových slov.

Vzhledem ke skutečnosti, že Mosel je pouze modelovací jazyk, který neobsahuje žádné optimalizační metody, vždy za klíčovým slovem model je uveden zápis uses „*mmxprs*“. Tento zápis zajistí inicializaci modulu Xpress – Optimizer, který již optimalizační metody obsahuje a bez něhož se při řešení jakýchkoliv optimalizačních úloh neobejdeme.

Proměnné a objekty, které jsou obsaženy v modelu je nutno zapsat v rámci bodu 3). Zápis začíná vždy klíčovým slovem declarations a končí klíčovým slovem end-declarations. Proměnné jsou definovány typem *mpvar*, který zajistí, že hodnoty proměnných budou větší nebo rovno 0.

Dále se v deklaracích užívají typy integer, real a string, které reprezentují celé, respektive reálná čísla nebo řetězce. Výše zmíněné tři typy se užívají k definování hodnot, které jsou známe před začátkem řešení modelu. V případě, kdy chceme proměnné nebo vstupní hodnoty zapsat jako dvourozměrné pole používá se zápisu array a of, např.:

*x*: **array** (1..*N*, 1..*M*) **of** *mpvar*.

Po deklarování proměnných a ostatních vstupních hodnot přichází na řadu zápis účelové funkce a strukturálních a obligatorních podmínek matematického modelu (bod 5). Pro zapsání matematického výrazu  $\sum$  slouží příkaz sum a v případě, kdy je nutné vyjádřit ve strukturálních podmínkách zápis skupiny podmínek, se využívá příkaz cyklu forall. Jednou z nesporných výhod programovacího jazyku Mosel je to, že zápis podmínek je intuitivní a podobný matematickému zápisu.

Po zapsání účelové funkce a omezujících podmínek následuje zápis optimalizace. Zápis optimalizace se odvíjí od skutečnosti, že za účelovou funkci maximalizujeme nebo minimalizujeme. V případě, kdy maximální hodnotu účelové funkce použijeme zápis maximize (účelová\_funkce), v případě opačném je zápis minimize (účelová\_funkce).

Pro výpis výstupů matematického modelu se v jazyku Mosel užívá příkazů writeln, pro zjištění hodnoty účelové funkce je použit příkaz getobjval a pro zjištění hodnot proměnných je použit příkaz getsol. Zápisy takovýchto příkazů mají následující tvary:

- 1) writeln (“Hodnota účelové funkce je: “,getobjval)
- 2) writeln (“proměnná: “,getsol(proměnná))

## 4 Cíle disertační práce

Předložená práce se věnuje problematice koordinace diskrétních transportních procesů, konkrétně jde o návrh časových poloh styků prvků přemísťujících přepravované elementy v uzlech transportní sítě, tedy jinými slovy, půjde o návrh časového harmonogramu koordinovaných diskrétních transportních procesů, tak aby celkové časové ztráty přepravovaných elementů přecházející mezi jednotlivými transportními procesy byly minimální. Disertační práce bude zaměřena na řešení problému síťové koordinace. Jedná se o problém, při kterém je časová koordinace diskrétních transportních procesů realizována ve více uzlech současně, přičemž musí být zohledněny kladné přemísťovací časy mezi jednotlivými koordinačními uzly. Protože při síťové koordinaci je nutno sledovat dodržení velkého počtu omezení, není v podmínkách 21. století příliš efektivní při požadavku na nalezení optimálního řešení, navrhovat časovou koordinaci diskrétních transportních procesů manuálně, ale je žádoucí využívat při návrhu časového harmonogramu diskrétních transportních procesů prostředky výpočetní techniky, proto bude časová koordinace realizována prostřednictvím systému pro podporu rozhodování. Na základě provedené analýzy současného stavu poznání je možno formulovat následující cíle disertační práce. Cíle této práce jsou navrženy následující:

1. Navrhnout metodu pro síťovou tvorbu časového harmonogramu diskrétních transportních procesů.
2. Aplikovat navržený systém pro podporu rozhodování v podmínkách reálné transportní sítě, na které diskrétní transportní procesy probíhají.
3. Prostřednictvím výsledků aplikačního experimentu zhodnotit výpočetní náročnost optimalizačního výpočtu.

Teoretické přínosy připravované disertační práce je možno spatřovat ve vytvoření obecně použitelné metody pro rozšíření časové koordinace, jejíž aplikační potenciál není omezen pouze na konkrétní případy.

Praktické přínosy disertační práce je možno spatřovat ve tvorbě nástroje, který bude z pohledu dopravce využitelný pro podporu rozhodování v případě časové provázanosti transportních procesů v uzlech, ve kterých dochází ke změně směru přepravovaného elementu.

## 5 Matematický model

V této kapitole bude publikován lineární matematický model pro optimální synchronizaci transportních procesů vyznačujících se charakteristickými rysy uvedenými v Kapitole 2.

Transportní sítě a transportní trasy mohou mít různou topologii a transportní procesy na nich probíhající mohou mít různý charakter a mohou být také různě organizovány. Transportní procesy na konkrétním úseku sítě mohou být rovněž koncipovány různě z pohledu jejich směrů. Transportní procesy mohou na konkrétním úseku probíhat v podstatě třemi způsoby:

- pouze jednosměrně probíhající transportní procesy,
- obousměrně probíhající transportní procesy se separovanými trasami pro jednotlivé směry,
- obousměrně na jedné trase.

Pro jednosměrný diskretní transportní proces je charakteristické, aby mezi jednotlivými komplety, které jsou předmětem transportních procesů probíhajících určitou rychlostí (rychlosti dvou za sebou probíhajících transportních procesů mohou být stejné, ale mohou být i různé), nastávaly v libovolném profilu transportní trasy časové odstupy, které zajišťují jejich bezpečný průběh. Může být požadováno, aby časové odstupy měly stejnou nebo různou délku (různé nastávají zpravidla v případě, kdy jednotlivé transportní procesy na stejné trase probíhají různými rychlostmi) a dále platí, že čím větší je rychlost transportních procesů, tím delší musí být časové odstupy mezi nimi. Pro některé transportní trasy (zejména pro trasy sloužící transportním procesům probíhajících vyšší rychlostí) může být charakteristická existence zabezpečovacího zařízení zajišťujícího dodržení předepsaných vzdálenostních nebo časových odstupů.

Pro obousměrně probíhající transportní procesy se separovanými trasami pro jednotlivé směry platí v podstatě totéž, co bylo uvedeno v předchozím odstavci. Jediným rozdílem ve srovnání s předchozím případem je skutečnost, že v daném úseku transportní trasy existují minimálně dvě trasy specializované pro opačné směry (každá pro jeden směr).

Poslední z uvedených případů uvedený v předchozí kategorizaci se vyskytuje u určitých typů tras ohraničených uzly (např. v případě traťových kolejí v mezistaničním úseku na železniční trati), kdy není možné, aby probíhaly dva protisměrné transportní procesy současně, protože bez dalších infrastrukturních opatření (na železniční infrastruktuře zřízení výhybny nebo dvoukolejné vložky pro letmé křížování) není možno zajistit jejich nekoliznost. Ze všech uvedených tří případů se jedná o nejkomplikovanější proces.

V případě, že by k výše uvedené situaci (kolizi obou protisměrných transportních procesů) na daném úseku došlo, tak je tento stav chápán jako poruchový a zapříčiní zastavení obou protisměrných transportních procesů.

Naopak běžný, neporuchový, stav tohoto systému je situace, kdy protisměrné transportní procesy neprobíhají současně v jednom úseku transportní trasy a k jejich koordinaci dojde pouze v uzlech ohraničujících jednotlivé úseky transportních tras, které jsou pro tyto účely uzpůsobeny.

Matematický model navržený pro obousměrně pojižděnou transportní trasu mezi dvěma uzly je dále využitelný také v tzv. výlukových stavech transportních tras spojujících vybrané dva uzly, kdy místo dvou či více jednosměrně obsluhovaných tras bude v provozu pouze jedna trasa obousměrně obsluhovaná. Pod pojmem výlukový stav je nutno rozumět plánovanou komplikaci v provozu způsobenou plánovaným odstavením dané transportní trasy v důsledku pravidelné údržby nebo odstranění nepříznivého technického stavu, který ovšem nenarušuje bezpečnost probíhajících transportních procesů takovým způsobem, že by bylo nutno provést okamžité zastavení provozu a odstranění nepříznivého technického stavu.

## 5.1 Formulace problému

V zadané dopravní síti je definována množina uzlů  $K$ , ve kterých je plánována změna transportních procesů přepravovaných elementů a množina uzlů  $D$ , ve kterých může dojít ke křížování transportních procesů. Množina uzlů  $K$  je složena ze dvou podmnožin označených jako  $K^G$  a  $K^C$ , přičemž platí  $K = K^G \cup K^C$  a zároveň  $K^G \cap K^C = \emptyset$ . Kromě toho je definována množina výchozích uzlů transportních procesů  $K^V$ . Platí, že výchozí uzel může náležet množině  $K^G$  nebo  $K^C$  nebo nemusí ležet v žádné z těchto množin.



Pro každý uzel  $k \in K$  je definována množina transportních procesů externích dopravců  $I_k^{CA}$ . Pro každý transportní proces  $i \in I_k^{CA}$  známe jeho čas příjezdu do uzlu  $k \in K$  a čas odjezdu z uzlu  $k \in K$  (pro zjednodušení je uvažováno, že čas příjezdu do uzlu  $k \in K$  a čas odjezdu z uzlu  $k \in K$  jsou shodné).

Pro každý uzel  $k \in K^G$  je definována množina směrů, do kterých transportní procesy odjíždějí  $S_k$ , množina transportních procesů do tohoto uzlu přijíždějících  $I_k^P$ , množina transportních procesů z tohoto uzlu odjíždějících do směru  $s \in S_k$  označená  $J_{sk}$ . Dále je pro každý přestupní uzel  $k \in K$  definována minimální nutná přestupní doba  $t_k^{prest}$  zahrnující výstup přepravovaného elementu z transportního procesu, přesun na nástupiště transportního procesu navazujícího a nastup do transportního prostředku.

Pro každý uzel  $k \in K^C$  je definována množina směrů, do kterých transportní procesy odjíždějí  $S_k$ , množiny transportních procesů do tohoto uzlu přijíždějících  $I_k^P$  a  $I_k^{CA}$  množiny transportních procesů z tohoto uzlu odjíždějících do směru  $s \in S_k$  označená  $J_{sk}$ . Dále je pro každý přestupní uzel  $k \in K$  definována přestupní doba  $t_k^{prest}$  zahrnující výstup přepravovaného elementu z transportního procesu, přesun na nástupiště transportního procesu navazujícího a nastup do transportního prostředku.

Když  $i \in I_k^{CA}$  a  $j \in J_{sk}$ , kde  $s \in S_k$  platí, že  $|S_k| = 1$ . Když  $i \in I_k^P$  a  $j \in J_{sk}$  platí, že  $|S_k| \geq 1$ .

Pro každý uzel  $d \in D$  jsou definovány transportní procesy, u kterých může vzniknout křižování  $I_d$ .

Je dána množina transportních procesů  $I^{GW}$  provozovaných na dané síti a množina procesů, se kterými jsou tyto procesy koordinovány v krajních uzlech (uzel Čičenice, Strakonice a České Budějovice) řešené transportní sítě  $I^{CA}$ .

Pro každý transportní proces  $i \in I^{GW}$  je definována množina uzlů, ve kterých se bude z daného transportního procesu přestupovat  $K_i$  a množina uzlů, ve kterých může proběhnout křižování daného transportního procesu s protisměrným transportním procesem  $D_i$ , nejdříve možný čas odjezdu z výchozího uzlu  $T_i^{adj}$ , doba jízdy z výchozího uzlu transportního procesu do přestupního uzlu  $k \in K_i$  označená  $t_{ik}$  a doba jízdy z výchozího uzlu do uzlu  $d \in D_i$  s možným křižováním označená  $\tau_{id}$ . Transportní procesy v jednotlivých směrech jezdí v pravidelných intervalech, které označíme symbolem  $TAKT$ .

Pro každý transportní proces  $i \in I^{GW}$  je definován maximální dovolený posun  $N$  vztahmo k nejdříve možné časové poloze transportního procesu (je konstantní pro všechny transportní procesy).

Pro každý koordinační uzel  $k \in K$  a směr  $s \in S_k$  je definována množina odjíždějících transportních procesů  $J_{sk}$ . Pro každý transportní proces odjíždějící z uzlu  $k \in K$  do směru  $s \in S_k$  je definována jeho nejdříve možná časová poloha.

Úkolem je rozhodnout o posunech časů odjezdů a příjezdů do koordinačních uzlů tak, aby celková časová ztráta přepravovaných elementů, které mění transportní proces byla minimální.

## 5.2 Návrh matematického modelu

Nejdříve vymezíme možné časy odjezdů transportních procesů z výchozích uzlů. Je požadováno, aby transportní procesy  $I^{GW}$  jezdily v předem definovaném taktu. Za účelem snazšího modelování budou transportní procesy vyjíždějící ve stejných směrech z jednotlivých výchozích uzlů seskupeny.

Označíme-li počet transportních procesů odjíždějících z výchozího uzlu  $k \in K^V$  jako  $n_k$ , potom nejdříve možné časy odjezdů transportních procesů  $j = 1, 2, \dots, n_k$  z výchozího uzlu (označeno indexem 1) budou vypočítány podle vztahu:

$$T_j^{odj} = T_1^{odj} + (j - 1) \cdot TAKT$$

a pro nejdříve možné časy odjezdů transportních procesů  $j = 1, 2, \dots, n_k$  z uzlu  $k \in K^V \setminus \{1\}$  bude vypočítán podle vztahu:

$$T_{(n_0 + \dots + n_{k-1} + j)}^{odj} = T_{(n_0 + \dots + n_{k-1} + 1)}^{odj} + (j - 1) \cdot TAKT$$

kde:

$T_{(n_0 + \dots + n_{k-1} + j)}^{odj}$ ... nejdříve možný čas odjezdu transportního procesu  $j = 1, 2, \dots, n_k$  z výchozího uzlu  $k \in K^V$ ,

$T_{(n_0 + \dots + n_{k-1} + 1)}^{odj}$ ...nejdříve možný čas odjezdu 1. transportního procesu z výchozího uzlu  $k \in K^V$ ,

$TAKT$ ...definovaná hodnota taktu mezi odjíždějícími transportními procesy.

V případě výchozího uzlu transportních procesů do více směrů je možno postupovat tak, že dojde k seskupení transportních procesů podle jednotlivých směrů.

Za účelem vymezení množiny protisměrných transportních procesů, u kterých může dojít ke křižování, byla zavedena incidenční matice  $A$ . Když je křižování transportních procesů  $i \in I_d$  a  $j \in I_d$  možné, potom  $a_{ij} = 1$ , v opačném případě  $a_{ij} = 0$ .

Do úlohy zavedeme následující proměnné:

- $x_i$  ... nezáporná proměnná modelující časový posun odjezdu transportního procesu  $i \in I$  z výchozího uzlu,
- $h_{ijsk}$  ... nezáporná proměnná modelující časovou ztrátu přepravovaných elementů, které přijeli do koordinačního uzlu  $k \in K$  transportním procesem  $i \in I_k^P$  a přestupují na transportní proces  $j \in J_{sk}$  odjíždějícím do směru  $s \in S_k$ ,
- $q_{ijd}$  ... nezáporná proměnná modelující časovou ztrátu při křižování protisměrných transportních procesů  $i \in I_d$  a  $j \in I_d$ ,  $a_{ij} = 1$  v uzlu  $d \in D$ ,
- $z_{ijsk}$  ... bivalentní proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi transportním procesem  $i \in I_k^P$  a transportním procesem  $j \in J_{sk}$  odjíždějícím do směru  $s \in S_k$  v uzlu  $k \in K$ ,
- $m_{ijd}$  ... bivalentní proměnná modelující naplánování křižování protisměrných transportních procesů  $i \in I_d$  a  $j \in I_d$ ,  $a_{ij} = 1$  v uzlu  $d \in D$ .

Matematický model bude mít tvar:

$$\begin{aligned} \min f(x, z, h, m, q) = & \sum_{i \in I_k^P} \sum_{j \in J_{sk}} \sum_{s \in S_k} \sum_{k \in K^C} h_{ijsk} + \sum_{i \in I_k^{CA}} \sum_{j \in J_{sk}} \sum_{s \in S_k} \sum_{k \in K^C} h_{ijsk} + \\ & + \sum_{i \in I_k^P} \sum_{j \in J_{sk}} \sum_{s \in S_k} \sum_{k \in K^G} h_{ijsk} + \sum_{i \in I_d} \sum_{j \in I_d} \sum_{d \in D} a_{ij} q_{ijd} \end{aligned} \quad (5.1)$$

za podmínek:

$$(T_j^{odj} + x_j) - (T_i^{odj} + t_k^{pres}) \geq M(z_{ijsk} - 1) \quad \text{pro } i \in I_k^{CA}, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^C, s \in S_k \quad (5.2)$$

$$(T_j^{odj} + x_j) - (T_i^{odj} + t_k^{pres}) \leq h_{ijsk} + M(1 - z_{ijsk}) \quad \text{pro } i \in I_k^{CA}, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^C, s \in S_k \quad (5.3)$$

$$\sum_{j \in J_{sk}^{GW}} \sum_{s \in S_k} z_{ijsk} = 1 \quad \text{pro } i \in I_k^{CA}, k \in K^C \quad (5.4)$$

$$T_j^{odj} - (T_i^{odj} + t_{ik} + x_i + t_k^{pres}) \geq M(z_{ijsk} - 1) \quad \text{pro } i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{CA}, k \in K^C, s \in S_k \quad (5.5)$$

$$T_j^{odj} - (T_i^{odj} + t_{ik} + x_i + t_k^{pres}) \leq h_{ijsk} + M(1 - z_{ijsk}) \quad \text{pro } i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{CA}, k \in K^C, s \in S_k \quad (5.6)$$

$$\sum_{j \in J_{sk}^{CA}} \sum_{s \in S_k} z_{ijsk} = 1 \quad \text{pro } i \in I_k^P, k \in K^C \quad (5.7)$$

$$(T_j^{odj} + t_{jk} + x_j) - (T_i^{odj} + t_{ik} + x_i + t_k^{pres}) \geq M(z_{ijsk} - 1) \quad \text{pro } i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^G, s \in S_k \quad (5.8)$$

$$(T_j^{odj} + t_{jk} + x_j) - (T_i^{odj} + t_{ik} + x_i + t_k^{pres}) \leq h_{ijsk} + M(1 - z_{ijsk}) \quad \text{pro } i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^G, s \in S_k \quad (5.9)$$

$$\sum_{j \in J_{sk}^{GW}} \sum_{s \in S_k} z_{ijsk} = 1 \quad \text{pro } i \in I_k^P, k \in K^G \quad (5.10)$$

$$(T_j^{odj} + \tau_{jd} + x_j) - (T_i^{odj} + \tau_{id} + x_i) \geq M(m_{ijd} - 1) \quad \text{pro } i \in I^{GW}, j \in I^{GW}, a_{ij} = 1, d \in D \quad (5.11)$$

$$(T_j^{odj} + \tau_{jd} + x_j) - (T_i^{odj} + \tau_{id} + x_i) \leq q_{ijd} + M(1 - m_{ijd}) \quad \text{pro } i \in I^{GW}, j \in I^{GW}, a_{ij} = 1, d \in D \quad (5.12)$$

$$\sum_{d \in D} m_{ijd} = 1 \quad \text{pro } i \in I^{GW}, j \in I^{GW}, a_{ij} = 1 \quad (5.13)$$

$$x_i \leq N \quad \text{pro } i \in I^{GW} \quad (5.14)$$

$$x_i \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in I^{GW} \quad (5.15)$$

$$h_{ijsk} \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in I_k^{CA}, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^C \vee i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{CA}, k \in K^C \vee i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^G \text{ a } s \in S_k \quad (5.16)$$

$$q_{ijd} \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in I^{GW}, j \in I^{GW}, a_{ij} = 1, d \in D \quad (5.17)$$

$$z_{ijsk} \in \{0,1\} \quad \text{pro } i \in I_k^{CA}, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^C \vee i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{CA}, k \in K^C \vee i \in I_k^P, j \in J_{sk}^{GW}, k \in K^G \text{ a } s \in S_k \quad (5.18)$$

$$m_{ijd} \in \{0,1\} \quad \text{pro } i \in I^{GW}, j \in I^{GW}, a_{ij} = 1, d \in D \quad (5.19)$$

Funkce (5.1), reprezentuje optimalizační kritérium celkové časové ztráty plynoucí z vytvoření přestupních vazeb mezi jednotlivými transportními procesy a celkové časové ztráty plynoucí z křížování protisměrných transportních procesů. Skupiny omezujících podmínek (5.2), (5.5) a (5.8) zajistí, že není-li možné navázat příjíždějící transportní proces na transportní proces odjíždějící v koordinačním uzlu, přestupní vazba mezi těmito transportními procesy nevznikne.

Skupiny omezujících podmínek (5.3), (5.6) a (5.9) zajistí, že při vzniku přestupní vazby mezi dvěma transportními procesy se do účelové funkce započítá odpovídající časová ztráta.

Skupiny omezujících podmínek ve dvojicích (5.2) a (5.3), (5.5) a (5.6) a (5.8) a (5.9) jsou takzvané podmínky typu „buď anebo“, tedy vždy je aktivní pouze jedna z uvedených podmínek. Skupiny omezujících podmínek (5.4), (5.7) a (5.10) zajišťují, že každému přijíždějícímu transportnímu procesu bude přiřazen právě jeden navazující.

Skupiny omezujících podmínek (5.11) a (5.12) zajistí, že pokud lze s danými protisměrnými transportními procesy ve vhodném uzlu realizovat křižování, toto křižování se uskuteční a časová ztráta plynoucí z čekání na protisměrný transportní proces bude započítána do hodnoty optimalizačního kritéria. Skupiny omezujících podmínek (5.13) zajistí, že pro každou dvojici protisměrných transportních procesů v případě, že je pro tuto dvojici křižování vyžadováno (tato podmínka je dána incidenční maticí) bude nalezen právě jeden uzel vhodný ke křižování. Skupina omezujících podmínek (5.14) definuje maximální možný časový posun transportních procesů. Skupiny omezujících podmínek (5.15), (5.16), (5.17), (5.18) a (5.19) vymezují definiční obory proměnných použitých v modelu.

## 6 Výpočetní experimenty

Jednou z aplikací, u které je možné navržený model využít je koordinace časů příjezdů a odjezdů vlaků osobní dopravy ve více přestupních uzlech současně v situacích, kdy je vlaková doprava organizována nižším počtem spojů s vyšší hodnotou linkového intervalu (v uvažovaném případě je hodnota intervalu nastavena na 2 hodiny).

Obecně platí, že celková doba přemístění elementů na dopravní síti je tvořena několika dílčími dobami a k jejímu výpočtu lze použít následující vzorec [31]:

$$t_p = t_1 + t_{\zeta} + t_{dp} + t_{př} + t_2 \quad (6.1)$$

kde:

$t_p$  – celková doba přemístění [min.],

$t_1$  – doba chůze od zdroje přemístění k zastávce [min.],

$t_{\zeta}$  – doba čekání na spoj [min.],

$t_{dp}$  – doba pobytu v dopravním prostředku (doba přepravy) [min.],

$t_{př}$  – doba přestupu (včetně doby čekání na přestupních uzlech) [min.],

$t_2$  – doba chůze od zastávky k cíli přemístění [min.].

Jak je ze vzorce patrné, jednou z možností, jak zkracovat dobu přemístění je i minimalizace čekání na přípojný spoje v přestupních uzlech.

Motivací k řešení problému je hledání přístupu umožňujícího maximální zvýšení plynulosti přepravy prostřednictvím zkracování čekacích dob v přestupních uzlech.

Časová koordinace dopravních procesů je potom založena na principu návrhu takových časových poloh spojů, které budou umožňovat minimalizaci časových ztrát cestujících od okamžiku nástupu do vozidla prvního spoje na jejich přepravní cestě do okamžiku výstupu z vozidla posledního spoje na jejich cestě.

Kapitola je zaměřena na charakteristiku vstupních údajů potřebných pro testovaný matematický model s uvedením jejich zdrojů a vyjádření dat v požadovaných fyzikálních jednotkách. Vstupní údaje jsou podrobeny analýze s cílem jejich přípravy pro požadované experimenty s lineárním matematickým modelem.

V dalším textu budou uváděny pojmy jako Dopravna D3, Autonomní dopravna, Jednotné obslužné pracoviště, Radioblok a Dopravna RB, proto budou uvedené pojmy detailněji charakterizovány.

Dopravna D3 je dopravna s kolejovým rozvětvením na trati D3 (řízená zjednodušeným způsobem řízení drážní dopravy), určená k řízení jízdy vlaků a PMD, která není obsazena výpravčím, výhybkářem ani strážníkem oddílu.

Autonomní dopravna je stanice (odbočka), ve které se vykonává dopravní služba podle předpisu SŽDC D1, na kterou navazuje v úrovni vjezdového návěstidla řízená oblast RB. Autonomní dopravna může být současně i sídlem dispečera RB.

Jednotné obslužné pracoviště (JOP) [32] slouží jako rozhraní mezi dopravním zaměstnancem a zabezpečovacím zařízením. Tvoří operativní úroveň u elektronických stavědel a center dálkového ovládání (DOZ) zabezpečovacího zařízení. Funkce JOP byly definovány z důvodu jednotnosti ovládání v jednotlivých stanicích. Principem činnosti jednotného obslužného pracoviště je definovaný:

- princip stavění vlakových cest, posunů, ovládání venkovních prvků a řešení všech dopravních situací, které v provozu nastanou přesně v souladu s návěstními předpisy místní železnice,
- systém zobrazení reliéfu kolejiště, barevné vyjádření volných a obsazených kolejových úseků, stavu návěstidel, výhybek a ostatních venkovních prvků. Tyto symboly mohou být změněny podle potřeb provozovatele dráhy.

Níže na obrázku 6.1 je zobrazeno pracoviště výpravčího v ŽST Volary.



Obrázek 6.1: Fotografie jednotného obslužného pracoviště v ŽST Volary, které slouží k dálkovému řízení tratě v úseku Volary – Nové Údolí. [autor]



Radioblok [33] je soubor technických prostředků (zobrazeno na obrázku 6.2 a 6.3) a administrativních opatření tvořící systém řízení a zabezpečení vedlejších tratí, určený pro nasazení na dirigovaných tratích. Hlavním úkolem systému je zvýšit bezpečnost provozu na těchto tratích. Systém pomocí užitých technických prostředků brání omylům obsluhy, zejména takovým, které vedly v minulosti k těžkým nehodovým událostem. Systém je koncipován tak, aby jeho investiční i provozní náklady byly minimalizovány. Toho je dosaženo nejen minimalizací nákladů na technické prostředky zhotovené výhradně pro radioblok, ale zejména využitím již existujících a na dopravní cestě používaných zařízení, která jsou vhodným způsobem integrována do systému.



Obrázek 6.2: Fotografie vestavěné části zařízení radioblok do hnacího vozidla řady 816.

[autor]





Obrázek 6.3: Fotografie ovládací skříňky zařízení radioblok ve hnacím vozidle řady 816.

[autor]

Dopravna RB je dopravna s kolejovým rozvětvením na trati RB, určená k řízení jízdy vlaků a PMD, která není obsazena výpravčím, výhybkářem ani strážníkem oddílu.

## 6.1 Železniční síť pro validaci matematického modelu (soubor tratí Šumava)

Pro validaci matematického modelu na reálných vstupních datech byla zvolena železniční síť nacházející se v Jihočeském kraji. Jedná se o soubor tří tratí s číselným označením 194, 197 a 198 (číslováno dle knižního jízdního řádu SŽ) na kterých provozuje železniční dopravu dopravce GWTR a je zobrazena na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Řešená železniční síť. [34]

Všechny tratě řešené sítě jsou tratě jednokolejné, u protisměrných vlaků je tedy nutno zajistit křižování v nácestných železničních stanicích.

Trať číslo 194 začíná v železniční stanici České Budějovice, vede přes Český Krumlov a končí v Černém Kříži. Organizování drážní dopravy na této trati se řídí dle předpisu SŽDC D1 což je dopravní a návěštní předpis, kdy doprava je řízena pomocí dálkově ovládaného zabezpečovacího zařízení.

Trať číslo 197 začíná v železniční stanici Číčenice, vede přes Prachatice, Volary, Černý Kříž a končí v Novém Údolí. Organizování drážní dopravy na této trati je řešeno v úseku Číčenice – Volary dle předpisu SŽDC D4 což je předpis pro řízení drážní dopravy na tratích vybavených RB (provoz na této trati se řídí pomocí datových zpráv probíhajících mezi železničním vozidlem a zabezpečovacím zařízením). V úseku Volary – Nové Údolí je organizování drážní dopravy opět dle předpisu SŽDC D1.

Trat' 198 začíná v železniční stanici Strakonice, vede přes Vimperk a končí ve Volarech. Organizování drážní dopravy na této trati se řídí dle předpisu SŽDC D3 což je předpis pro zjednodušené řízení drážní dopravy (jízdy vlaků jsou řízeny na základě telefonického dorozumívání mezi strojvedoucím a dispečerem).

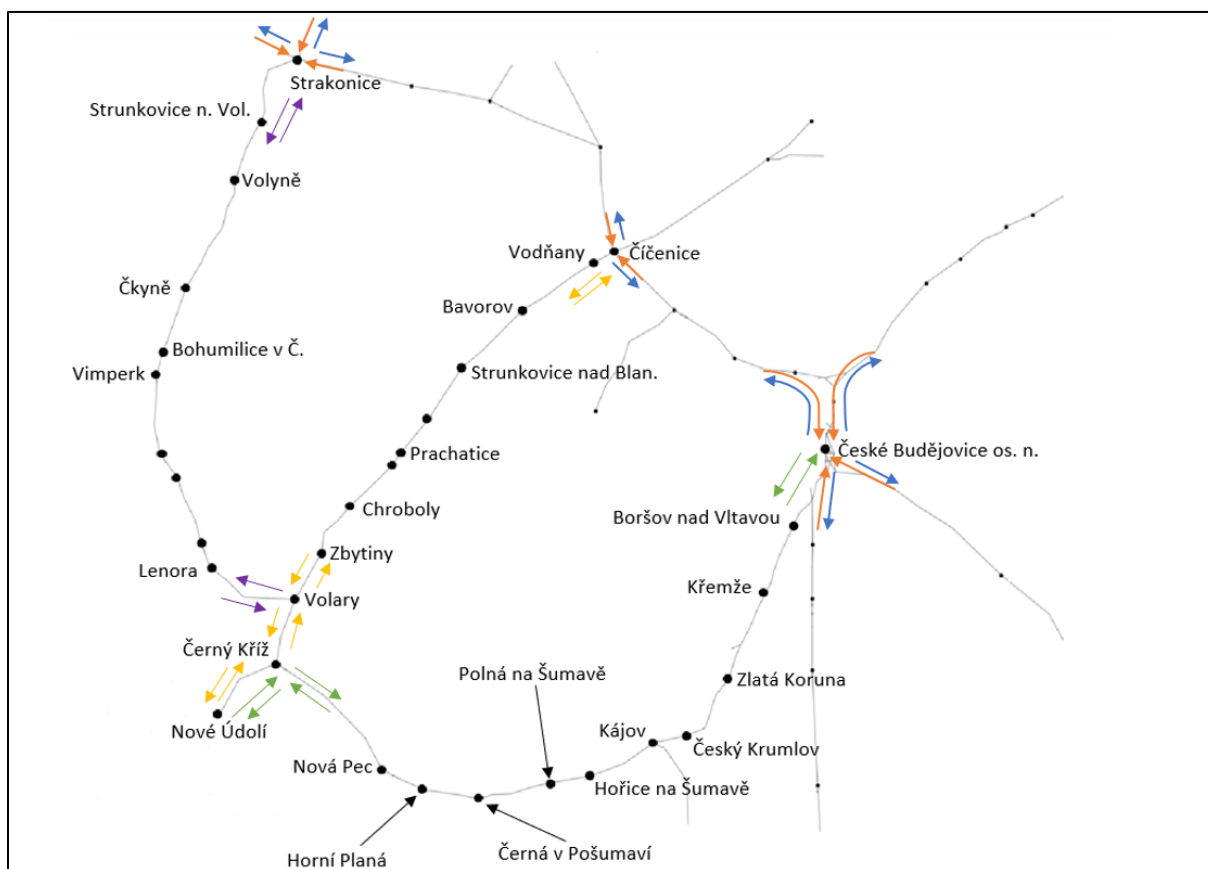
Provoz na charakterizované železniční síti je téměř periodický a pro plánovaný stav bude požadováno, aby vlakové spoje odjížděly z výchozích železničních stanic v 2-hodinovém taktu.

## 6.2 Popis uzlů železniční sítě (železniční stanice)

Z pohledu řešené železniční sítě se zde nacházejí dva typy uzlů (stanic). Prvním typem jsou uzly, kde dochází ke koordinaci vlakových spojů (je zde realizován přestup cestujících) a v druhém typu uzlů dochází ke křížování spojů (protisměrné vlakové spoje se v těchto uzlech setkávají). V některých uzlech dochází jak k přestupům cestujících, tak i ke křížování vlakových spojů. Výčet všech uzlů podle jednotlivých typů je uveden níže. K popisu jednotlivých uzlů byl použit zdroj [35].

### 6.2.1 Uzly, ve kterých dochází ke koordinaci vlakových spojů

Na obrázku 6.5 je zobrazena řešená železniční síť s uvedenými směry vlakových spojů.



Obrázek 6.5: Řešená železniční síť se znázorněním přestupních vazeb. [autor]

Oranžové a modré směry na obrázku 6.5 reprezentují přestupy mezi vlakovými spoji externích dopravců. Fialové směry na obrázku 6.5 reprezentují přestupy mezi vlakovými spoji na trati 198, žluté směry reprezentují přestupy mezi vlakovými spoji na trati 197 a zelené směry reprezentují přestupy mezi vlakovými spoji na tratích 194 a 197.

V úvodu práce bylo uvedeno, že cílem je navrhnout matematický model umožňující minimalizaci časových ztrát přestupujících cestujících prostřednictvím časových posunů vlakových spojů.

Přestupy se mohou uskutečňovat na spoje (ze spojů), jejichž časové polohy je možno měnit na spoje (ze spojů), jejichž časové polohy měnit nelze. Vlakové spoje, u kterých změnu časové polohy nelze provést, jsou spoje externích dopravců.

Na obrázku 6.5 jsou směry, v nichž lze časové posuny vlakových spojů provádět, znázorněny fialovou, žlutou a zelenou barvou a směry, v nichž časové posuny nelze provádět znázorněny oranžovou a modrou barvou.

## Strakonice

Železniční stanice Strakonice leží v km 272,615 trati celostátní dráhy České Budějovice - Plzeň hl. n. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je obsazena výpravčím.

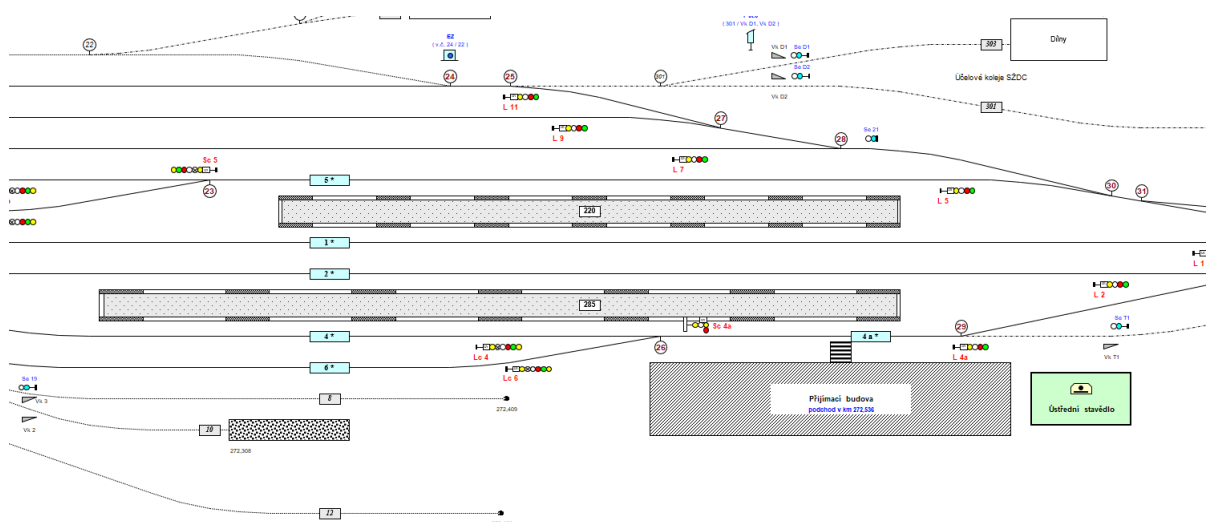
Je stanicí:

- odbočnou pro tratě Strakonice - Vimperk a Březnice – Strakonice,
- přílehlou pro tratě D3 Strakonice - Vimperk a Březnice – Strakonice.

Ve stanici jsou dvě nástupiště, označená 1, 2:

- ostrovní nástupiště číslo 1 leží mezi kolejemi číslo 2 a 4. Má délku 285 m a šířku 6,46 m,
- ostrovní nástupiště číslo 2 leží mezi kolejemi číslo 1 a 5. Má délku 220 m a šířku 6,46 m.

Schéma kolejiště ŽST Strakonice je uvedeno na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6: Schéma kolejiště železniční stanice Strakonice. [36]

V uzlu Strakonice dochází ke koordinaci vlakových spojů v následujícím rozsahu:

- (Vimperk) Strakonice > Ražice a Ražice > Strakonice (Vimperk),
- (Vimperk) Strakonice > Horažďovice a Horažďovice > Strakonice (Vimperk),
- (Vimperk) Strakonice > Blatná a Blatná > Strakonice (Vimperk).

## Číčenice

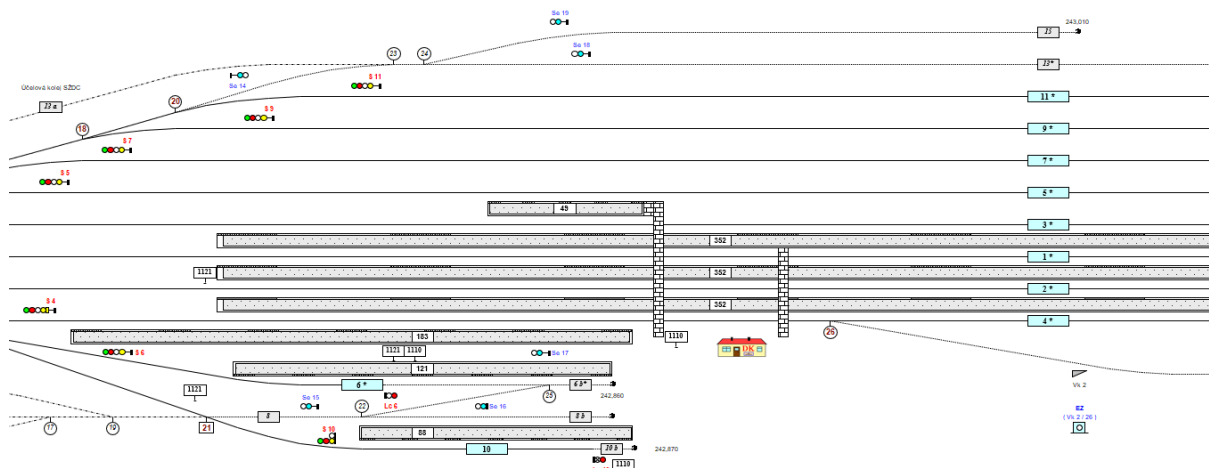
Železniční stanice Číčenice leží:

- v km 242,906 trati celostátní dráhy České Budějovice - Plzeň hl. n. Trať je v přilehlém mezistaničním úseku Dívčice - Číčenice dvoukolejná; v přilehlém mezistaničním úseku Číčenice - Protivín jednokolejná.
- v km 0,000 trati regionální dráhy Číčenice - Volary; trať je v přilehlém prostorovém oddílu jednokolejná. Je stanicí: • přednostního směru pro 1. traťovou kolej směr Číčenice - Dívčice;
- odbočnou pro trať RB Číčenice - Volary a pro trať regionální dráhy Číčenice - Týn nad Vltavou;
- autonomní dopravnou pro trať RB Číčenice - Volary.

Stanice je obsazena výpravčím. V železniční stanici Číčenice je 7 nástupišť.

1. jednostranné úrovňové nástupiště u koleje číslo 1 vpravo, má délku 352 m.
2. jednostranné úrovňové nástupiště u koleje číslo 2 vpravo, má délku 352 m.
3. jednostranné úrovňové nástupiště u koleje číslo 3 vpravo, má délku 352 m.
4. jednostranné úrovňové nástupiště u koleje číslo 4 vpravo, má délku 183 m.
5. jednostranné úrovňové nástupiště u koleje číslo 5 vpravo, má délku 49 m.
6. jednostranné úrovňové nástupiště u koleje číslo 6 vlevo, má délku 121 m.
7. jednostranné úrovňové nástupiště u koleje číslo 10 vlevo, má délku 88 m.

Schéma kolejíště ŽST Číčenice je uvedeno na obrázku 6.7.



Obrázek 6.7: Schéma kolejí železniční stanice Číčenice. [36]

V uzlu Číčenice dochází ke koordinaci vlakových spojů v následujícím rozsahu:

- (Prachatice) Číčenice > Protivín a Protivín > Číčenice (Prachatice),
- (Prachatice) Číčenice > Dívčice a Dívčice > Číčenice (Prachatice).

### České Budějovice osobní nádraží

Železniční stanice České Budějovice leží:

- v km 213,388 trati celostátní dráhy České Velenice - České Budějovice,
- v km 119,750 trati celostátní dráhy Horní Dvořiště - České Budějovice,
- v km 0,000 trati regionální dráhy Volary - České Budějovice,
- v km 213,388 trati celostátní dráhy České Budějovice - Plzeň hl. n.,
- v km 0,000 trati celostátní dráhy České Budějovice - Benešov u Prahy [v úseku České Budějovice (úroveň návěstidel 1S, 2S) - Nemanice (úroveň výhybky číslo 1) platí pouze kilometry dráhy České Budějovice - Plzeň hl. n.].

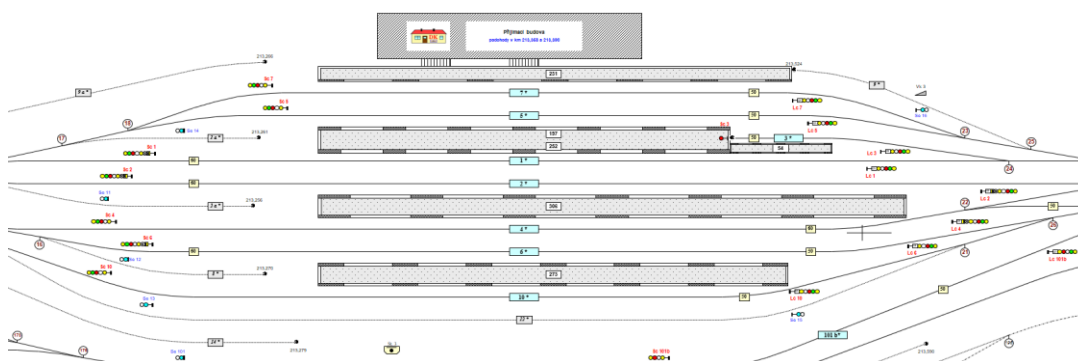
V přilehlých mezistaničních úsecích jsou tratě jednokolejné. Stanice je obsazena výpravčím. V mezistaničním úseku České Budějovice - Nemanice jsou dvě souběžné jednokolejné tratě, které jsou označeny místními názvy:

1. traťová kolej pro trať České Budějovice - Plzeň hl. n.,
2. traťová kolej pro trať České Budějovice - Benešov u Prahy.

ŽST České Budějovice je stanicí odbočnou pro tratě:

- České Budějovice - Plzeň hl. n.;
- České Budějovice - Benešov u Prahy;
- Volary - České Budějovice;
- České Velenice - České Budějovice;
- Horní Dvořiště - České Budějovice.

Schéma kolejíště ŽST České Budějovice osobní nádraží je uvedeno na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8: Schéma kolejíště železniční stanice České Budějovice osobní nádraží. [36]

V železniční stanici České Budějovice osobní nádraží jsou 4 nástupiště.

1. nástupiště leží u koleje číslo 7. Jeho délka je 230 metrů (km 213,293 - km 213,523) a šířka k ose koleje 8,15 metru.

2. nástupiště leží mezi kolejemi číslo 5 a 1. Jeho délka u 5. koleje je 196 metrů (km 213,293 - km 213,489); u 1. koleje je jeho délka 250 metrů (km 213,293 - km 213,543) a šířka mezi osami kolejí je 12,3 metrů.

3. nástupiště leží mezi kolejemi číslo 2 a 4, jeho délka je 304 metrů (km 213,293 – km 213,597) a šířka mezi osami kolejí je 12,3 metrů.

4. nástupiště leží mezi kolejemi číslo 6 a 10, jeho délka je 271 metrů (km 213,293 – km 213,564) a šířka mezi osami kolejí je 12 metrů.



V uzlu České Budějovice osobní nádraží dochází ke koordinaci vlakových spojů v následujícím rozsahu:

- (Český Krumlov) ČB os. n. > Horní Dvořiště a Horní Dvořiště > ČB os. n. (Český Krumlov)
- (Český Krumlov) ČB os. n. > České Velenice a České Velenice > ČB os. n. (Český Krumlov)
- (Český Krumlov) ČB os. n. > Veselí nad Lužnicí a Veselí nad Lužnicí > ČB os. n. (Český Krumlov)
- (Český Krumlov) ČB os. n. > Číčenice a Číčenice > ČB os. n. (Český Krumlov)

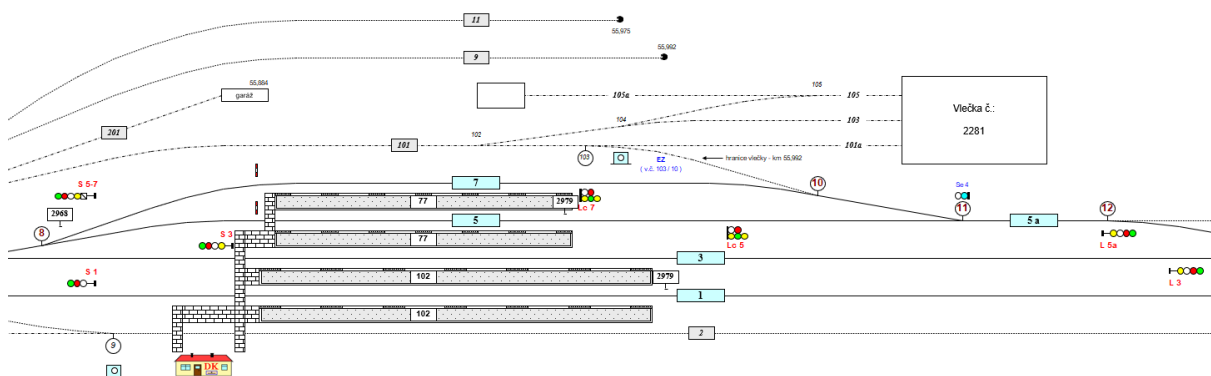
## Volary

Železniční stanice Volary leží v km 55,871 trati regionální dráhy Číčenice - Volary a km 70,783 trati regionální dráhy Strakonice - Volary. Trať je v přilehlém mezistaničním úseku Černý kříž - Volary i v přilehlých prostorových oddílech Lenora - Volary i Zbytiny - Volary jednokolejná. Ze ŽST Volary je dálkově řízena ŽST Černý Kříž a ŽST Nové Údolí včetně mezistaničního úseku Volary - Černý Kříž a Černý Kříž - Nové Údolí. Stanice je obsazena výpravčím.

Je:

- dirigující pro trať D3 Vimperk – Volary,
- autonomní dopravnou pro trať RB Číčenice – Volary.

Schéma kolejiště ŽST Volary je uvedeno na obrázku 6.9.



Obrázek 6.9: Schéma kolejiště železniční stanice Volary. [36]

Ve stanici jsou čtyři nástupiště:

- úroňové nástupiště číslo 1, u koleje číslo 1, má délku 102 m;
- úroňové nástupiště číslo 2, u koleje číslo 3, má délku 102 m;
- úroňové nástupiště číslo 3, u koleje číslo 5, má délku délce 77 m;
- úroňové nástupiště číslo 4, u koleje číslo 7, má délku 77 m.

V uzlu Volary dochází ke koordinaci vlakových spojů v následujícím rozsahu:

- (Černý Kříž) Volary > Vimperk (Strakonice) a Vimperk (Strakonice) > Volary (Černý Kříž)

### Černý Kříž

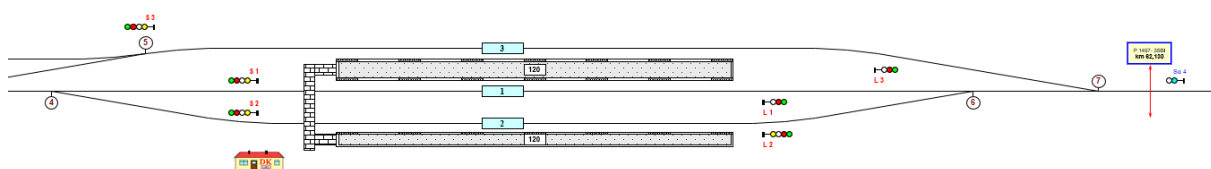
Železniční stanice Černý Kříž leží v km 61,866 jednokolejné regionální trati Volary - České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná.

ŽST Černý Kříž je stanicí odbočnou pro trať Černý Kříž - Nové Údolí.

V ŽST Černý Kříž jsou dvě nástupiště označená 1 - 2:

- poloostrovní úroňové nástupiště číslo 1 mezi kolejemi číslo 1 a 3 v délce 120 m,
- vnější úroňové nástupiště číslo 2 u koleje číslo 2 v délce 120 m.

Schéma kolejíště ŽST Černý Kříž je uvedeno na obrázku 6.10.



Obrázek 6.10: Schéma kolejíště železniční stanice Černý Kříž. [36]

V uzlu Černý Kříž dochází ke koordinaci transportních procesů v následujícím rozsahu:

- (Volary) Černý Kříž > Český Krumlov (ČB os. n.) a Český Krumlov (ČB os. n.) > Černý Kříž (Volary)

## 6.2.2 Uzly, ve kterých může dojít ke křižování vlakových spojů na trati 198

### **Strunkovice n. Vol.**

Dopravna D3 Strunkovice nad Volyňkou leží v km 7,006. V této dopravně nejsou žádná nástupiště a z tohoto důvodu slouží pouze ke křižování vlakových spojů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

### **Volyně**

Dopravna D3 Volyně leží v km 10,954. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 91 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 3 s délkou 44 metrů. Tato dopravna není osazena samovratnými výhybkami, a tedy není zahrnuta v matematickém modelu.

### **Čkyně**

Dopravna D3 Čkyně leží v km 23,115. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 45 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 3 s délkou 60 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

### **Bohumilice v Č.**

Dopravna D3 Bohumilice v Č. leží v km 27,081. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 30 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 2 s délkou 30 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

### **Vimperk**

Železniční stanice Vimperk leží v km 32,417 trati regionální dráhy Strakonice - Volary. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je obsazena výpravčím.

Je stanicí:

- dirigující pro trať D3 Strakonice – Vimperk,
- přílehlou pro trať D3 Vimperk – Volary.

### **Lipka**

Dopravna D3 Lipka leží v km 42,883. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 a 3 s délkou 66 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

### **Kubova Huť**

Dopravna D3 Kubova Huť leží v km 48,527. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 30 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 3 s délkou 30 metrů.

Tato dopravna není osazena samovratnými výhybkami, a tedy není zahrnuta v matematickém modelu.

### **Lenora**

Dopravna D3 Lenora leží v km 61,084. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 47 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 2 s délkou 64 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

### **6.2.3 Uzly, ve kterých může dojít ke křížování vlakových spojů na trati 197**

#### **Vodňany**

Dopravna RB Vodňany leží v km 4,309. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 60 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 3 s délkou 60 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

#### **Bavorov**

Dopravna RB Bavorov leží v km 12,413. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 41 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 3 s délkou 41 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

#### **Strunkovice nad Blanicí**

Dopravna RB Strunkovice nad Blanicí leží v km 18,623. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 55 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 3 s délkou 45 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

#### **Prachatice**

Železniční stanice Prachatice leží v km 27,577 trati regionální dráhy Číčenice - Volary. Přilehlé mezistaniční úseky jsou jednokolejné. Stanice je obsazena výpravčím.

Je autonomní dopravnou pro trať RB Číčenice - Volary.

#### **Chroboly**

Dopravna RB Chroboly leží v km 36,654. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 46 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 2 s délkou 46 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

## **Zbytiny**

Dopravna RB Zbytiny leží v km 45,495. V této dopravně se nachází nástupiště u koleje č. 1 s délkou 45 metrů, druhé nástupiště se nachází u koleje č. 2 s délkou 42 metrů. Tato dopravna je osazena samovratnými výhybkami.

**ŽST Volary a ŽST Černý Kříž** byly uvedeny v kapitole 6.2.1.

### **6.2.4 Uzly, ve kterých může dojít ke křižování vlakových spojů na trati 194 Boršov nad Vltavou**

Železniční stanice Boršov nad Vltavou leží v km 3,640 trati regionální dráhy Volary - České Budějovice. Stanice je dálkově řízena z DOZ v ŽST Kájov. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. V železniční stanici Boršov nad Vltavou jsou dvě nástupiště označená 1, 2:

- úrovněvé nástupiště číslo 1 u koleje číslo 1 má délku 140 metrů,
- úrovněvé nástupiště číslo 2 u koleje číslo 3 má délku 140 metrů.

## **Křemže**

Železniční stanice Křemže leží v km 13,949 trati regionální dráhy Volary - České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je dálkově řízena z DOZ v ŽST Kájov. V železniční stanici Křemže je zřízeno mezi kolejemi číslo 1 a 3 ostrovní nástupiště s pevnou nástupní hranou v délce 125 metrů (km 13,798 - km 13,923).

## **Zlatá Koruna**

Železniční stanice Zlatá Koruna leží v km 22,116 trati regionální dráhy Volary - České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je dálkově řízena z DOZ v ŽST Kájov. V železniční stanici Zlatá Koruna jsou dvě nástupiště:

- poloostrovní nástupiště u koleje číslo 3 v délce 125 metrů (km 22,144 - km 22,269),
- poloostrovní nástupiště u koleje číslo 1 v délce 125 metrů (km 22,144 - km 22,269).

## **Český Krumlov**

Železniční stanice Český Krumlov leží v km 27,044 trati regionální dráhy Volary – České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je dálkově řízena ze ŽST Kájov. V železniční stanici Český Krumlov je zřízeno ostrovní nástupiště s pevnou nástupní hranou v délce 110 metrů (km 25,498 - km 25,388). Mezi kolejemi 1 a 3.

## **Kájov**

Železniční stanice Kájov leží v km 32,050 trati regionální dráhy Volary – České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je trvale obsazena výpravčím, který plní funkci výpravčího DOZ pro trať Černý Kříž (mimo) – České Budějovice (mimo). Ve stanici je jedno poloostrovní nástupiště s pevnou nástupní hranou u koleje má délku 125 m.

## **Hořice na Šumavě**

Železniční stanice Hořice na Šumavě leží v km 41,814 trati regionální dráhy Volary - České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je dálkově ovládána výpravčím z pracoviště DOZ ŽST Kájov. Ve stanici je jedno poloostrovní úrovňové nástupiště mezi kolejemi číslo 1 a 2, které má délku 125 m.

## **Polná na Šumavě**

Železniční stanice Polná na Šumavě leží v km 48,354 trati regionální dráhy Volary - České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná.

Stanice je dálkově ovládána výpravčím z pracoviště DOZ ŽST Ve stanici jsou 2 nástupiště označená 1, 2:

- nástupiště číslo 1, u koleje číslo 3, má délku 120 m,
- nástupiště číslo 2, u koleje číslo 1, má délku 125 m.

## **Černá v Pošumaví**

Železniční stanice Černá v Pošumaví leží v km 58,244 trati regionální dráhy Volary - České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je dálkově ovládána výpravčím z pracoviště DOZ ŽST Kájov. Ve stanici je jedno poloostrovní nástupiště mezi kolejemi číslo 1 a 2. Má délku 125 m.

## **Horní Planá**

Železniční stanice Horní Planá leží v km 63,749 trati regionální dráhy Volary – České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je dálkově ovládána výpravčím z pracoviště DOZ ŽST Kájov. Ve stanici je jedno nástupiště poloostrovní úrovňové, mezi kolejemi číslo 1 a 2, má délku 125 m.

## Nová Pec

Železniční stanice Nová Pec leží v km 71,348 trati regionální dráhy Volary – České Budějovice. Trať je v přilehlých mezistaničních úsecích jednokolejná. Stanice je dálkově ovládána výpravčím z pracoviště DOZ ŽST Kájov. Ve stanici je jedno nástupiště poloostrovní úrovnové, mezi kolejemi číslo 1 a 3, má délku 125 m.

### 6.3 Přestupní doby

V lineárním matematickém modelu je potřebná doba na přestup mezi dvěma transportními procesy (vlakovými spoji) v koordinačním uzlu (železniční stanici) označena  $t_k^{pres}$ . Tato doba je stanovena pro každý koordinační uzel (železniční stanici) jednotlivě a má zásadní vliv pro přípojný vlaky. V níže uvedené části bude vysvětleno, jaké transportní procesy (vlakovými spoji) jsou považovány za přípojný a na základě jakých pravidel se toto posuzování řídí.

Pravidla pro definování přípojných transportních procesů (vlakových spojů) jsou uvedena v dokumentu *Přípoje mezi vlaky osobní dopravy*, jenž je pomůckou grafikonu vlakové dopravy a je vydáván na platnost GVD (v některých letech dochází ke změnám tohoto dokumentu i v průběhu platnosti GVD). Uvedená pomůcka je platná pro JŘ 2020 a o přípojných vlcích hovoří následovně [38]:

*Pomůcka Přípoje mezi vlaky osobní dopravy stanovuje podmínky, za jakých bude zajištěna návaznost a umožněn přestup cestujících mezi vlaky osobní dopravy. Další opatření při zpoždění vlaků osobní dopravy jsou uvedeny v pomůcce „Prováděcí nařízení ke Směrnici pro řízení provozu na tratích SŽDC, státní organizace, D7 část B – Zásady pro řízení provozu na vybraných tratích“.*

Dále tento dokument definuje pojmy *přípoj* (čl. 1 pomůcky), *nepřípoj* (čl. 2 pomůcky), *přípojný vlak* (čl. 3 pomůcky) a *přestupní doba* (čl. 9 pomůcky) takto:

**Přípoj** – *přípojem jsou vlaky, u kterých je v rámci jedné stanice (jednoho obvodu stanice uvedeného samostatně v jízdním řádu pro cestující) mezi pravidelným příjezdem prvního (přípojného) vlaku a pravidelným odjezdem druhého (návazného) vlaku nejméně dvě minuty a nejvíce šedesát minut (přípoj s přestupní dobou jedna minuta může být uveden v tabulkové části čekacích dob). V případě zpoždění prvního vlaku platí postup uvedený v článku 4. Případy, kdy je přípoj i z jiného obvodu stanice, jsou uvedeny v tabulkové části pomůcky „Přípoje mezi vlaky osobní dopravy“.*

**Nepřípoj** – nepřipoj je dvojice, nebo skupina vlaků, mezi kterými nebude ani při včasné jízdě zajištěn přestup cestujících. Nepřípojně vlaky jsou:

- a) vlaky, u kterých je v rámci jedné stanice (jednoho obvodu stanice uvedeného samostatně v jízdním řádu pro cestující) mezi příjezdem prvního (přípojného) vlaku a odjezdem druhého (návazného) vlaku 0 až 1 minuta;
- b) vlaky opačného směru téže trati – tedy v případech, kdy přípojný vlak přijíždí ze stejné sousední stanice (neplatí pro odbočky, které nejsou zastávkou), do které bude odjíždět návazný vlak a bez ohledu na to, zda vlak v této stanici zastavuje (výjimky jsou uvedeny pro jednotlivé stanice v tabulkové části této pomůcky);
- c) vlaky stejného směru téže trati – tedy v případech, kdy přípojný a návazný vlak mají v pokračování své trasy shodné následující místo pravidelného zastavení;
- d) vlaky ve stanicích s delší přestupní dobou, kde mezi příjezdem prvního (přípojného) vlaku a odjezdem druhého (návazného) vlaku není tato přestupní doba dodržena a tato skutečnost je vyznačena značkou ● v KJŘ u názvu stanice a je uvedena v tabulkové části čekacích dob (bez ohledu na základní přestupní doby v článku 9). V těchto stanicích lze stanovit vlaky, které budou přípojem s kratší přestupní dobou a budou uvedeny v tabulkové části pomůcky „Přípoje mezi vlaky osobní dopravy“ pro danou stanici;
- e) vlaky, u kterých je sice dodržena doba potřebná na přestup, ale u nichž je pomůckou „Čekací doby a opatření při zpoždění vlaků osobní dopravy“ stanoveno, že „není přípoj mezi vlaky“. Tato skutečnost musí být rovněž vyznačena v KJŘ značkou ● (u časového údaje příjezdu prvního vlaku);
- f) vlaky různých dopravců.

**Přípojný vlak** – je vlak nebo vlaky, na který ve stanici navazuje návazný vlak nebo vlaky (dle článku 1).

**Přestupní doba** – je doba potřebná na přestup, která mezi příjezdem přípojného a odjezdem návazného vlaku postačí pro bezpečný přestup cestujících. Za dodržení přestupní doby odpovídá zaměstnanec řízení provozu SŽDC a lze ji zkrátit po ověření, že přestup byl uskutečněn. Základní přestupní doby jsou uvedeny v tabulce pod tímto článkem. Odlišné přestupní doby musí být uvedeny v tabulkové části pomůcky „Přípoje mezi vlaky osobní dopravy“. Pokud se vyplňuje odlišná přestupní doba pro danou stanici, uvedou se všechny možné přestupní doby.



<b>druh přestupu</b>	<b>délka přestupní doby [min.]</b>
<i>přestup bez použití podchodu, kdy cestující překračuje nejvýše dvě koleje</i>	<b>2</b>
<i>přestup bez použití podchodu, kdy cestující překračuje více než dvě koleje</i>	<b>3</b>
<i>přestup podchodem na sousední nástupiště</i>	<b>3</b>

*Při přestupu o každé další nástupiště se navyšuje přestupní doba o jednu minutu.*

*Jsou-li ve stanici rozdělená nástupiště (například na severní a jižní, východní a západní) navyšuje se přestupní doba o jednu minutu, pokud cestující při přestupu překonává toto dělení nástupiště (jde ze severní části na jižní).*

*V případě, že vjezdem přípojného vlaku na obsazenou kolej dojde k prodloužení vzdálenosti pro přestup cestujících, zvýší se přestupní doba o jednu minutu.*

Pro koordinační uzly (železniční stanice) České Budějovice os. n., Číčenice, Strakonice, Volary a Černý Kříž je stanovena jednotná přestupní doba a to 3 min.

#### 6.4 Seznam transportních procesu (vlakových spojů)

Grafikon vlakové dopravy a jeho pomůcky jsou jedny z nejdůležitějších dokumentů pro řízení a organizování vlakové dopravy v železniční stanici a mezistaničních úsecích. Pro lineární matematický model má nejdůležitější význam pomůcka seznam vlakových spojů, jízdní doby vlakových spojů mezi jednotlivými křižujícími (koordinačními) uzly (železničními stanicemi vhodnými pro křižování) a pobyty transportních procesů (vlakových spojů) v jednotlivých nácestných stanicích. Z těchto dokumentů získáme údaje o kvalitativních (o časových polohách) jednotlivých transportních procesů (vlakových spojů). Jedná se o tyto údaje:

- druh vlakového spoje,
- číslo vlakového spoje na příjezdu / číslo vlakového spoje na odjezdu

Číslo vlakového spoje na příjezdu do železniční stanice nemusí být totožné s číslem vlakového spoje na jeho odjezdu z železniční stanice.

- číslo staniční koleje, na kterou má vlakový spoj definován pravidelný vjezd,
- plánovaný čas příjezdu vlakového spoje na stanovenou staniční kolej (v matematickém modelu označeno  $T_i^{adj}$ ),

- doba pobytu vlakového spoje v železniční stanici,
- plánovaný čas odjezdu vlakového spoje ze stanovení staniční koleje (v matematickém modelu označeno  $T_j^{odj}$ ),
- poznámka určující platnost jízdy vlakového spoje,
- předcházející a následnou dopravu vlakového spoje,
- fyzické parametry vlakového spoje (délka, hmotnost vlakového spoje, řada hnacího vozidla).

Na základě výše uvedeného byly do lineárního matematického modelu použity následující vstupní údaje, jízdní doby pro trať 194, 197 a 198 (uvedeny v tabulkách 6.1, 6.2 a 6.3), časy příjezdů a odjezdů transportních procesů (vlakových spojů) rozdělených pro transportní procesy (vlakové spoje) (uvedeny v tabulkách 6.4, 6.5, 6.6 a 6.7) u kterých je možné provést časový posun a u kterých tento časový posun nelze provést.

Tabulka 6.1: Jízdní doby pro trať České Budějovice – Nové Údolí.

Koordinační uzel vhodný pro křížování - $D$	Jízdní doba z Českých Budějovic ve směru Nové údolí [hh:mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Českých Budějovic ve směru Nové údolí [mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Nového Údolí ve směru České Budějovice [hh:mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Nového Údolí ve směru České Budějovice [mm] - $\tau_{id}$
České Budějovice	0:00	0	2:21	141
Boršov nad Vltavou	0:09	9	2:09	129
Křemže	0:23	23	1:55	115
Zlatá Koruna	0:36	36	1:42	102
Český Krumlov	0:52	52	1:31	91
Kájov	1:00	60	1:20	80
Hořice na Šumavě	1:14	74	1:06	66
Polná na Šumavě	1:24	84	0:56	56
Černá v Pošumaví	1:38	98	0:42	42
Horní Planá	1:50	110	0:35	35
Nová Pec	1:59	119	0:23	23
Černý Kříž	2:17	137	0:05	5
Nové Údolí	2:28	148	0:00	0

Tabulka 6.2: Jízdní doby pro trať Čičenice – Nové Údolí.

Koordinační uzel vhodný pro křižování - <i>D</i>	Jízdní doba z Čičenic ve směru Nové údolí [hh:mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Čičenic ve směru Nové údolí [mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Nového Údolí ve směru Čičenice [hh:mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Nového Údolí ve směru Čičenice [mm] - $\tau_{id}$
Čičenice	0:00	0	2:04	124
Vodňany	0:07	7	1:58	118
Bavorov	0:22	22	1:45	105
Strunkovice nad Blaníci	0:32	32	1:33	93
Prachatice	0:55	55	1:20	80
Chroboly	1:08	68	1:01	61
Zbytiny	1:23	83	0:47	47
Volary	1:47	107	0:30	30
Černý Kříž	1:56	116	0:12	12
Nové Údolí	2:07	127	0:00	0

Tabulka 6.3: Jízdní doby Strakonice – Volary.

Koordinační uzel vhodný pro křižování - <i>D</i>	Jízdní doba ze Strakonic ve směru Volary [hh:mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba ze Strakonic ve směru Volary [mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Volar ve směru Strakonice [hh:mm] - $\tau_{id}$	Jízdní doba z Volar ve směru Strakonice [mm] - $\tau_{id}$
Strakonice	0:00	0	1:53	113
Strunkovice nad Volyňkou	0:11	11	1:41	101
Čkyně	0:37	37	1:15	75
Bohumilice v Čechách	0:43	43	1:08	68
Vimperk	0:53	53	1:00	60
Lenora	1:37	97	0:15	15
Volary	1:42	102	0:00	0

Tabulka 6.4: Nejdříve možné časy příjezdů vlakových spojů do koordinačních uzlů České Budějovice, Čičenice a Strakonice – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $I_k^{CA}$ .

Čas příjezdu do Českých Budějovic [hh:mm]	Čas příjezdu do Českých Budějovic [mm]	Čas příjezdu do Strakonice [hh:mm]	Čas příjezdu do Strakonice [mm]	Čas příjezdu do Čičenic [hh:mm]	Čas příjezdu do Čičenic [mm]
7:50	470	8:51	531	8:18	498
7:51	471	9:05	545	8:25	505
7:54	474	9:50	590	8:42	522
7:56	476	10:32	632	9:10	550
8:02	482	10:45	645	9:32	572
8:05	485	10:51	651	9:39	579
8:30	510	11:05	665	10:18	618
8:41	521	11:50	710	10:25	625
8:45	525	12:32	752	10:39	639
8:51	531	12:45	765	10:41	641
8:52	532	12:51	771	11:00	660
8:58	538	13:05	785	11:10	670
9:11	551	13:21	801	11:32	692
9:49	589	13:50	830	11:39	699
9:54	594	14:32	872	12:18	738
9:56	596	14:45	885	12:25	745
9:58	598	14:51	891	12:39	759
10:02	602	15:05	905	12:41	761
10:41	641	15:45	945	13:00	780
10:48	648	15:47	947	13:10	790
10:51	651	16:18	978	13:32	812
11:02	662	16:32	992	13:35	815
11:09	669	16:50	1010	14:18	858
11:29	689	16:51	1011	14:25	865
11:49	709	17:04	1024	14:39	879
11:51	711	17:05	1025	14:41	881
11:54	714	17:48	1068	15:00	900
11:56	716	18:32	1112	15:09	909
11:57	717	18:45	1125	15:32	932
12:02	722	18:51	1131	15:35	935
12:41	761			16:18	978
12:45	765			16:25	985
12:51	771			16:40	1000
12:57	777			16:41	1001
13:09	789			17:15	1035
13:27	807			17:17	1037
13:49	829			17:32	1052
13:52	832			17:35	1055

13:54	834			18:18	1098
13:56	836			18:25	1105
14:02	842			18:40	1120
14:41	881			18:41	1121
14:44	884			19:10	1150
14:48	888				
14:51	891				
14:58	898				
15:07	907				
15:21	921				
15:27	927				
15:49	949				
15:51	951				
15:54	954				
15:56	956				
15:58	958				
16:02	962				
16:30	990				
16:41	1001				
16:48	1008				
16:49	1009				
16:51	1011				
16:57	1017				
16:58	1018				
17:02	1022				
17:06	1026				
17:27	1047				
17:48	1068				
17:49	1069				
17:52	1072				
17:54	1074				
17:56	1076				

Tabulka 6.5: Nejdříve možné časy odjezdů vlakových spojů z koordinačního uzlu České Budějovice – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $J_{sk}$ .

Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru Horní Dvořiště [hh:mm]	Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru Horní Dvořiště [mm]	Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru České Velenice [hh:mm]	Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru České Velenice [mm]	Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru Veselí n. Lužnicí [hh:mm]	Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru Veselí n. Lužnicí [mm]	Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru Číčenice [hh:mm]	Čas odjezdu z Českých Budějovic ve směru Číčenice [mm]
12:06	726	12:10	730	11:57	717	12:04	724
13:02	782	14:10	850	12:02	722	12:13	733
14:03	843	15:10	910	13:02	782	12:42	762
15:01	901	16:10	970	13:08	788	13:12	792
16:06	966	17:10	1030	13:12	792	14:04	844
17:02	1022	18:10	1090	13:57	837	14:13	853
18:03	1083	20:10	1210	14:02	842	14:27	867
20:06	1206	23:02	1382	14:08	848	14:42	882
21:10	1270			14:57	897	15:12	912
22:59	1379			15:02	902	15:29	929
				15:08	908	16:04	964
				15:12	912	16:13	973
				15:57	957	16:33	993
				16:02	962	16:52	1012
				16:08	968	17:12	1032
				17:02	1022	17:38	1058
				17:08	1028	18:04	1084
				17:14	1034	18:13	1093
				17:57	1077	18:42	1122
				18:02	1082	19:12	1152
				19:08	1148	20:04	1204
				19:12	1152	20:13	1213
				20:08	1208	21:07	1267
				20:57	1257	22:08	1328
				21:10	1270	22:57	1377
				22:02	1322		
				23:02	1382		

Tabulka 6.6: Nejdříve možné časy odjezdů vlakových spojů z koordinačního uzlu Strakonice  
 – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $J_{sk}$ .

Čas odjezdu ze Strakonic ve směru Ražice [hh:mm]	Čas odjezdu ze Strakonic ve směru Ražice [mm]	Čas odjezdu ze Strakonic ve směru Horažďovice [hh:mm]	Čas odjezdu ze Strakonic ve směru Horažďovice [mm]	Čas odjezdu ze Strakonic ve směru Blatná [hh:mm]	Čas odjezdu ze Strakonic ve směru Blatná [mm]
11:06	666	10:53	653	11:10	670
11:19	679	12:53	773	13:10	790
12:07	727	13:55	835	15:15	915
13:06	786	14:53	893	16:21	981
13:22	802	16:53	1013	17:10	1030
14:02	842	17:51	1071	19:10	1150
14:36	876	18:53	1133	21:10	1270
15:06	906	20:53	1253	22:40	1360
15:19	919				
16:02	962				
17:06	1026				
17:19	1039				
17:32	1052				
18:07	1087				
19:06	1146				
19:19	1159				
21:06	1266				
21:20	1280				
22:30	1350				

Tabulka 6.7: Nejdříve možné časy odjezdů vlakových spojů z koordinačního uzlu Čičenice – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $J_{sk}$ .

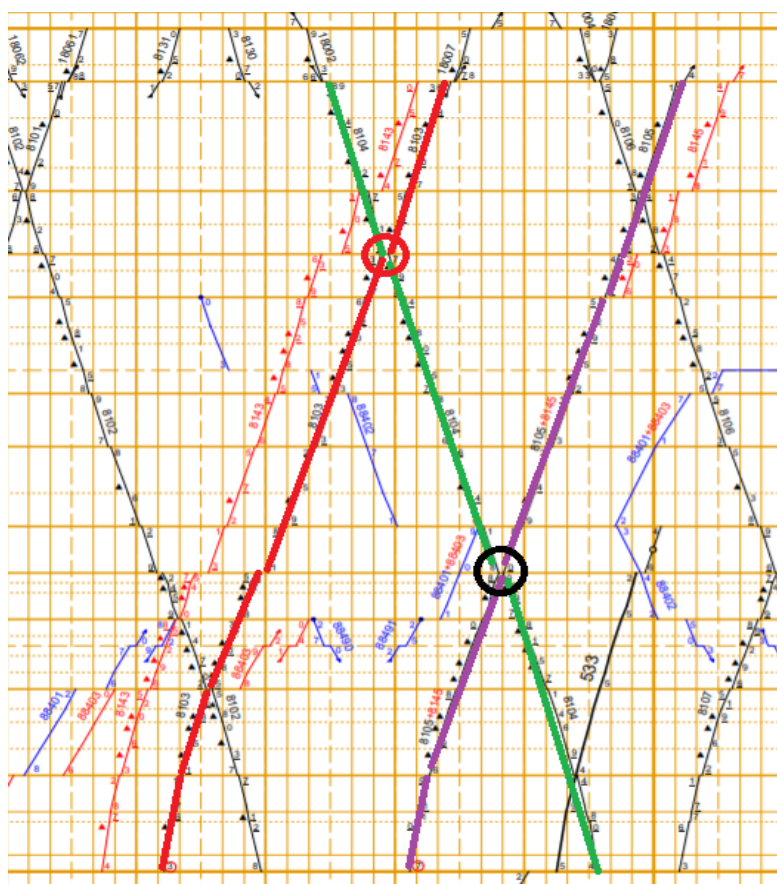
Čas odjezdu z Čičenic ve směru Protivín [hh:mm]	Čas odjezdu z Čičenic ve směru Protivín [mm]	Čas odjezdu z Čičenic ve směru Dívčice [hh:mm]	Čas odjezdu z Čičenic ve směru Dívčice [mm]
8:26	506	8:19	499
9:11	551	8:42	522
9:40	580	9:33	573
10:26	626	10:19	619
10:41	641	10:41	641
11:11	671	11:00	660
11:40	700	11:33	693
12:26	746	12:19	739
12:41	761	12:41	761
13:11	791	13:00	780
13:36	816	13:33	813
14:26	866	14:19	859
14:41	881	14:41	881
15:10	910	15:00	900
15:36	936	15:33	933
16:26	986	16:19	979
16:41	1001	16:41	1001
17:18	1038	17:21	1041
17:36	1056	17:33	1053
18:26	1106	18:19	1099
18:41	1121	18:41	1121
19:11	1151	19:33	1173
19:36	1176	19:59	1199
20:26	1226	20:19	1219
21:36	1296	21:33	1293
23:26	1406		

V případě protisměrných vlakových spojů obsluhujících tratě 194, 197 a 198 je nutno řešit křižování v nácestných stanicích. Nutnost řešit křižování protisměrných vlaků je definována incidenční maticí, jejíž fragment je uveden v tabulce 6.8. V případě, že je nutno řešit křižování mezi vlakovými spoji  $i$  a  $j$ , je v incidenční matici uvedena hodnota  $a_{ij} = 1$ , v opačném případě hodnota 0. Není uvažováno s křižováním vlakových spojů v jejich výchozích uzlech (železničních stanicích) neboť by při vzniku této situace mohlo dojít k hromadění vlakových souprav ve výchozí železniční stanici. Na obrázku 6.10 je zobrazen fragment nákrešného jízdního řádu vyjadřující nutnost křižování protisměrných vlakových spojů korespondující s incidenční maticí.



Tabulka 6.8: Fragment incidenční matice vyjadřující nutnost křižování protisměrných  
vlakových spojů (celá tabulka je uvedena v příloze č. 1).

			194 - Odjezd z Českých Bud.						194 - Odjezd z Nového Údolí					
A	Čas Odjezdu [hh:mm]		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
Čas Odjezdu [hh:mm]	Pořadí		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
194 - Odjezd z Českých Bud.	8:00	1	x	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	10:00	2	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	12:00	3	0	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	14:00	4	0	0	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0
	16:00	5	0	0	0	0	x	0	0	0	0	1	1	0
	18:00	6	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	1	1
194 - Odjezd z Nového Údolí	9:00	7	1	1	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0
	11:00	8	0	1	1	0	0	0	0	x	0	0	0	0
	13:00	9	0	0	1	1	0	0	0	0	x	0	0	0
	15:00	10	0	0	0	1	1	0	0	0	0	x	0	0
	17:00	11	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	x	0
	19:00	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	x



Obrázek 6.11: Fragment nákrešného jízdního řádu vyjadřující nutnost křižování  
protisměrných vlakových spojů korespondující s incidenční maticí. [autor]

Na všech výše zmíněných tratích (194, 197 a 198) zajišťuje provoz železniční dopravce GWTR. Jedná se tedy o uzavřenou železniční síť, která je napojena na síť externích (dopravců).

Funkčnost navrženého modelu bude otestována na síti uvedené na obrázku 6.4. Provoz na charakterizované železniční síti je téměř periodický a pro plánovaný stav bude požadováno, aby vlakové spoje odjížděly z výchozích železničních stanic v 2-hodinovém taktu. V rámci modelu je uvažováno s celkem 38 periodickými vlakovými spoji, u kterých lze provést změnu časové polohy a dále je zde uvažováno s celkem 299 vlakovými spoji, u kterých změnu časové polohy nelze provést.

Vlakové spoje, u kterých nelze provést změnu časové polohy, obsluhují koordinační uzly České Budějovice, Číčenice a Strakonice.

Počet přijíždějících vlakových spojů do železniční stanice České Budějovice je 70, do železniční stanice Číčenice 43 a do železniční stanice Strakonice 30. V tomto případě není uvažováno, z jakého směru tyto vlakové spoje přijíždějí, jelikož v rámci modelu je zajištěno, aby pro každý výše uvedený vlakový spoj byla vytvořena právě jedna přestupní vazba na spoj odjíždějící.

Počet odjíždějících vlakových spojů z železniční stanice České Budějovice je celkově 70 přičemž směrové rozdělení je následující, 10 spojů odjíždí ve směru Horní Dvořiště, 8 spojů ve směru České Velenice, 27 spojů ve směru Veselí nad Lužnicí a 25 spojů ve směru Číčenice. Počet odjíždějících vlakových spojů z železniční stanice Strakonice je celkově 35 přičemž směrové rozdělení je následující, 19 spojů odjíždí ve směru Ražice, 8 spojů ve směru Horažďovice a 8 spojů ve směru Blatná. Počet odjíždějících vlakových spojů z železniční stanice Číčenice je celkově 51 přičemž směrové rozdělení je následující, 26 spojů odjíždí ve směru Protivín a 25 spojů ve směru Dívčice.

Vlakové spoje, u kterých lze provést změnu časové polohy jsou rozděleny následovně. Na trati 194 je výchozích vlakových spojů celkem 12 (pro 6 vlakových spojů je výchozím uzlem železniční stanice České Budějovice a pro 6 vlakových spojů železniční stanice Nové Údolí). Na Trati 197 je výchozích vlakových spojů celkem 14 (pro 7 vlakových spojů je výchozím uzlem železniční stanice Číčenice a pro 7 vlakových spojů železniční stanice Nové Údolí). Na trati 198 je výchozích vlakových spojů celkem 12 (pro 6 vlakových spojů je výchozím uzlem železniční stanice Strakonice a pro 6 vlakových spojů železniční stanice Volary).

Po dosazení vstupních hodnot do navrženého matematického modelu byly dosaženy následující výsledky, viz tabulka 6.9.

Z dosažených výsledků je možno vidět, že došlo k posunům vlakových spojů a byly taktéž nalezeny uzly vhodné pro křižování jednotlivých vlakových spojů.

Na základě výsledků matematického modelu a následného převedení dosažených hodnot do podoby nákrešného jízdního řádu lze srovnat charakteristiku provozu na jednotlivých tratích se současným stavem.

Na trati 194 došlo k zavedení taktového provozu, kdy dochází ke křižování v železničních stanicích Horní Planá a Český Krumlov a odjezdy jednotlivých vlakových spojů jsou taktové. V současném stavu vlakové spoje odjíždějí pouze v přibližně podobných časových polohách a místa křižování vlakových souprav nejsou jednotná.

Na trati 197 zůstal zachován taktový provoz a zachována zůstala i místa křižování, tedy stanice Bavorov a Zbytiny. Došlo pouze ke změně časových poloh vlakových spojů.

Na trati 198 zůstal zachován taktový provoz a došlo ke změně jednoho místa křižování a to z železniční stanice Čkyně, na Bohumilice v Čechách. Dále došlo k časovému posunu vlakových spojů.

Dalším výstupem matematického modelu bylo vytvoření přestupních vazeb. V uzlech Strakonice, Čičenice, České Budějovice, Černý Kříž a Volary bylo vytvořeno celkově 220 vazeb, a časová ztráta plynoucí z přestupů mezi jednotlivými vlakovými spoji činí 7 002 min. Časová ztráta plynoucí z přestupů mezi jednotlivými vlakovými spoji za současného stavu činí 7 749 min, z čehož vidíme, že po optimalizaci došlo ke snížení ztrátového času o 747 min.

Tabulka 6.9: Dosažené výsledky matematického modelu.

Směr	Čas odjezdu před optimalizací [hh:mm]	Nejdříve možný čas odjezdu před optimalizací [mm], [hh:mm] - $T_f^{odj}$		Posun [mm] - $x$	Čas odjezdu po optimalizaci [mm], [hh:mm]		Železniční stanice křižování
České Budějovice > Nové Údolí	8:13	8:00	480	5	8:05	485	Horní Planá, Český Krumlov
	10:07	10:00	600	5	10:05	605	
	12:13	12:00	720	5	12:05	725	
	14:26	14:00	840	5	14:05	845	
	16:13	16:00	960	5	16:05	965	
	18:13	18:00	1080	5	18:05	1085	
Nové Údolí > České Budějovice	9:15	9:00	540	30	9:30	570	
	11:22	11:00	660	30	11:30	690	
	13:19	13:00	780	30	13:30	810	
	15:23	15:00	900	30	15:30	930	
	17:21	17:00	1020	30	17:30	1050	
	19:18	19:00	1140	30	19:30	1170	
Číčenice > Nové Údolí	7:39	7:30	450	5	7:35	455	Bavorov, Zbytiny
	9:42	9:30	570	5	9:35	575	
	11:42	11:30	690	5	11:35	695	
	13:40	13:30	810	5	13:35	815	
	15:40	15:30	930	5	15:35	935	
	17:40	17:30	1050	5	17:35	1055	
	19:40	19:30	1170	5	19:35	1175	
Nové Údolí > Číčenice	6:14	6:00	360	24	6:24	384	
	8:00	8:00	480	24	8:24	504	
	10:15	10:00	600	24	10:24	624	
	12:15	12:00	720	24	12:24	744	
	14:15	14:00	840	24	14:24	864	
	16:19	16:00	960	24	16:24	984	
	18:16	18:00	1080	24	18:24	1104	
Strakonice > Volary	9:25	9:00	540	8	9:08	548	Bohumilice v Č., Lenora
	11:25	11:00	660	8	11:08	668	
	13:25	13:00	780	8	13:08	788	
	15:25	15:00	900	8	15:08	908	
	17:25	17:00	1020	8	17:08	1028	
	19:25	19:00	1140	8	19:08	1148	
Volary > Strakonice	8:47	8:30	510	27	8:57	537	
	10:47	10:30	630	27	10:57	657	
	12:47	12:30	750	27	12:57	777	
	14:47	14:30	870	27	14:57	897	
	16:47	16:30	990	27	16:57	1017	
	18:47	18:30	1110	27	18:57	1137	

## 7 Zhodnocení dosažených výsledků a diskuse

Předložená disertační práce měla tři hlavní cíle, které jsou specifikovány v Kapitole 4.

Prvním hlavním cílem disertační práce bylo navrhnout metodu pro síťovou tvorbu časového harmonogramu diskrétních transportních procesů. Pro řešení zadaného problému byl navržen lineární matematický model, jehož řešením je naplánování takových časových poloh transportních procesů, které maximalizují plynulost v místech jejich přerušení (maximalizace plynulosti je realizována prostřednictvím minimalizace hodnoty optimalizačního kritéria – celkové časové ztráty plynoucí z přerušení transportních procesů).

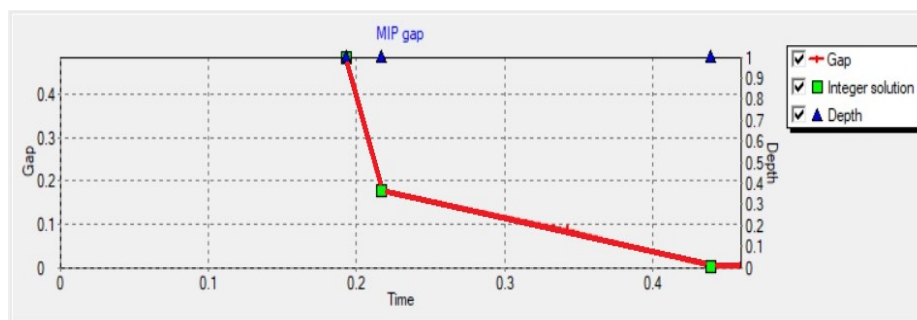
Druhým hlavním cílem předložené disertační práce bylo aplikovat navržený systém pro podporu rozhodování v podmínkách reálné transportní sítě, na které diskrétní transportní procesy probíhají. Za tím účelem byla vybrána část železniční sítě Jihočeského kraje, na které je pravidelná železniční osobní doprava provozována železničním dopravcem GWTR. Železniční síť je specifická tím, že je tvořena jednokolejnými železničními tratěmi, které kladou na časovou koordinaci vlakových spojů největší nároky. Hodnota celkové časové ztráty před optimalizací činila 7 749 min. a po optimalizaci 7 002 min., hodnota o kterou se snížila časová ztráta přestupujících cestujících činí 747 min. Ve výsledku optimalizačního výpočtu se však vyskytuje hodnota časové ztráty 7 463 min., která zahrnuje kromě časové ztráty v přestupních uzlech také časové ztráty v nácestných železničních stanicích jednotlivých vlakových spojů ve kterých je po optimalizaci navrženo pravidelné křížování.

Třetím hlavním cílem bylo prostřednictvím výsledků aplikačního experimentu zhodnotit výpočetní náročnost optimalizačního výpočtu. Výpočetní náročnost řešené konkrétní úlohy s 5 přestupními stanicemi, 22 stanicemi určenými ke křížování, 337 vlakovými spoji, z nichž časové polohy bylo možno měnit u 38 vlakových spojů, činila 0,5 s.

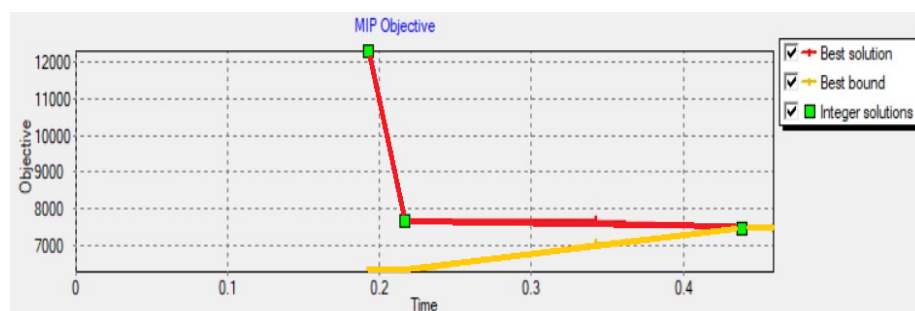
Obrázek 7.1 reprezentuje průběhu veličiny nazývané GAP, která vyjadřuje šířku neprozkoumaného intervalu hodnot mezi nejlepším nalezeným řešením a hodnotou nejnižšího odhadu optimalizačního kritéria.

Obrázek 7.2 reprezentuje vývoj hodnot nejlepšího dosaženého řešení a nejnižšího odhadu optimalizačního kritéria.

Obrázek 7.3 reprezentuje statistické údaje o realizovaném výpočetním experimentu.



Obrázek 7.1: Graf časové náročnosti výpočtu optimálního řešení. [Xpress-IVE]



Obrázek 7.2: Graf průběhu konvergence k optimálnímu řešení v čase. [Xpress-IVE]

Stats			
<b>Matrix:</b>		<b>Presolved:</b>	
Rows(constraints):	8760	Rows(constraints):	1362
Columns(variables):	6594	Columns(variables):	2243
Nonzero elements:	28222	Nonzero elements:	4794
Global entities:	4263	Global entities:	1096
Sets:	0	Sets:	0
Set members:	0	Set members:	0
Overall status: <b>Finished global search.</b>			
<b>LP relaxation:</b>		<b>Global search:</b>	
Algorithm:	Barrier	Current node:	1
Simplex iterations:	1229	Depth:	1
Objective:	6309	Active nodes:	0
Status:	Unfinished	Best bound:	7462.99
Time:	0.2s	Best solution:	7463
		Gap:	8.45371e-005%
		Status:	Solution is optimal.
		Time:	0.5s
<b>Time overheads:</b>			
Progress graphs:	0.3s		
Writing output:	0.0s		
Pausing:	0.0s		
Updating status:	0.3s		

Obrázek 7.3: Stavové hlášení programu Xpress-IVE o nalezení optimálního řešení. [Xpress-IVE]

Po ukončení optimalizačního výpočtu realizovaného za účelem minimalizace časových ztrát přestupujících cestujících a schválení navrhovaných změn jízdního řádu je třeba řešit zpracování návazných provozních úloh. K těmto návazným pracovním úlohám patří zejména:

- aktualizace oběhů železničních kolejových vozidel,
- aktualizace turnusů vlakového personálu (nástupní tabulky strojvedoucích, průvodčích),
- aktualizace plánu doplňování provozních hmot železničních kolejových vozidel,
- aktualizace technologií týkající se odstavování železničních kolejových vozidel,
- aktualizace čekacích dob v přestupních uzlech,
- projednání změn jízdních řádů s přidělcem kapacity dráhy,
- aktualizace míst pravidelného křižování.

Dosažené výsledky experimentů, které byly předmětem Kapitoly 6, by dle výše uvedených bodů měly následující dopady na organizaci provozu. První podstatnou změnou by bylo projednání této změny s přidělcem kapacity dráhy v rámci všech dotčených vlakových spojů, u kterých došlo k časovému posunu. Bez souhlasu přidělce kapacity dráhy nemůže železniční dopravce realizovat změny v časových polohách vlakových spojů, a to ani v situaci, že je jediným provozovatelem drážní dopravy na dané trati. Na základě této změny by mohlo také dojít k úpravě míst pravidelného křižování protisměrných vlakových spojů. Další změnou, kterou by bylo třeba provést, je nutnost aktualizace tabulek vlakového personálu tedy strojvedoucích a průvodčích. V případě čekacích dob, oběhů kolejových vozidel, plánu doplňování provozních hmot a technologie odstavování železničních kolejových vozidel dosažené výsledky neznamenaají zásadní změny, jelikož nedošlo k markantním časovým posunům vyžadujícím změny této provozní dokumentace.

## 8 Možnosti uplatnění matematických metod a informatických nástrojů v operativním řízení technologických procesů

Ať jsou technologické procesy naplánovány sebelépe včetně jejich synchronizace, nikdy nebudou natolik robustní, aby odolaly všem možným provozním komplikacím, které mohou jejich průběh negativně ovlivnit.

Matematický model navržený v Kapitole 5 a validovaný v Kapitole 6 slouží primárně k dlouhodobějšímu plánování synchronizace vícezdrojových procesů. Lineární programování, na jehož principech řešení navrženého modelu spočívá, svými metodami nalezení optimálního řešení sice garantuje, nicméně jeho možnosti mohou náhodné vlivy zpracovávat pouze v omezené míře. Proto i využitelnost navrženého lineárního matematického modelu může být určitým způsobem omezená. Je-li např. termín provozní komplikace některé z transportních tras (např. odstavení transportní trasy z důvodu její pravidelné prohlídky) dostatečně dopředu znám, potom je možno model navržený v Kapitole 5 uplatnit a optimalizovat výši celkové časové ztráty za změněných podmínek. Některé typy provozních komplikací, např. technická závada na transportní trase, však mohou být obtížně predikovatelné, a připravit se na její vznik nemusí být vždy reálné.

Definovat matematické metody a informatické nástroje v obecném rámci operativního řízení technologických procesů může být specifické a také obtížně splnitelné, protože detaily, ve kterých se jednotlivé typy technologických procesů při vzniku jejich neočekávaných poruch liší, mohou proces operativního řízení významně ovlivnit. V kontextu předložené disertační práce se proto pozornost omezí na charakteristiku konkrétních problémů operativního řízení železniční dopravy probrané v Kapitole 6 tak, aby bylo možno posoudit do jaké míry je možno model navržený v Kapitole 5 pro potřeby operativního řízení využívat.

Za účelem operativního řízení bývají v železniční dopravě zřizována specializovaná pracoviště, která jsou k dispozici provozním zaměstnancům zpravidla po celou denní dobu, kdy technologické procesy (jízdy vlaků, posun) probíhají. Při vzniku nečekaných provozních komplikací pověřený řídicí pracovník ve směně (dispečer dopravce/provozovatele dráhy) reaguje na vzniklé situace výkonem svých pracovních povinností. Provozní komplikace v železniční dopravě se v podmínkách tratí, na kterých byl validován koordinační model v Kapitole 6, dělí do dvou základních skupin – na mimořádné události a mimořádnosti v provozu.



*Mimořádné události v železniční dopravě jsou následujících typů [39]:*

- a) střet drážních vozidel,*
- b) vykolejení drážního vozidla,*
- c) střet drážního vozidla s překážkou na dopravní cestě dráhy,*
- d) střet drážního vozidla se silničními vozidly, včetně střetů drážních vozidel s chodci na úrovňovém křížení dráhy s pozemní komunikací,*
- e) střet pohybujícího se drážního vozidla s osobou mimo úrovňové křížení dráhy s pozemní komunikací,*
- f) lom kolejnice, při kterém došlo k ohrožení pohybujícího se drážního vozidla,*
- g) lom kola nebo nápravy drážního vozidla, při kterém došlo k ohrožení pohybujícího se drážního vozidla,*
- h) selhání návěstních (zabezpečovacích) systémů,*
- i) vybočení koleje, při kterém došlo k ohrožení pohybujícího se drážního vozidla,*
- j) nedovolená jízda drážního vozidla za návěstidlo zakazující jízdu,*
- k) nezajištěná jízda drážního vozidla,*
- l) ujetí drážního vozidla,*
- m) jízda drážního vozidla při otevřeném přejezdu,*
- n) roztržení vlaku osobní dopravy,*
- o) požáry nebo výbuchy v drážních vozidlech,*
- p) únik nebo ohrožení bezprostředním rizikem úniku nebezpečné věci při její přepravě po železnici, které není vážnou nehodou nebo nehodou,*
- q) blíže nespecifikované MU, vzniklé v souvislosti s provozováním drážní dopravy nebo s pohybem drážního vozidla.*

Mimořádnostmi v provozu jsou:

- a) zastavení drážního vozidla před překážkou na trati,
- b) porucha drážního vozidla na trati nebo v železniční stanici,
- c) porucha zabezpečovacího zařízení znemožňující další jízdu drážních vozidel,
- d) porucha podpůrných systému drážní dopravy (např. přerušení trolejového vedení),
- e) jiné události, které nesplňují charakter mimořádné události.

Obě kategorie provozních komplikací se od sebe liší závažností následků. Co mají společné je však to, že vždy dojde k předčasnému a dočasnému ukončení jízdy drážního vozidla, odchylky od jízdního řádu a tedy ke vzniku časové ztráty cestujících, tedy zvýšení hodnoty optimalizačního kritéria.

Období od okamžiku vzniku obou kategorií provozních komplikací do okamžiku obnovení běžného provozu se dá rozdělit do dvou dílčích období. První dílčí období následuje bezprostředně po vzniku provozní komplikace a je určeno k likvidaci neodkladných následků provozní komplikace. Druhé dílčí období následuje bezprostředně po skončení prvního dílčího období a je zaměřeno na odstranění ostatních následků provozní komplikace bránících obnovení běžného provozu.

Z pohledu cestujících dotčených vznikem mimořádné události je možno cestující rozdělit do následujících tří kategorií:

První kategorii tvoří cestující, kteří se nacházejí přímo v kolejovém vozidle, které je dotčeno vzniklou provozní komplikací. Nejkomplikovanější situace z pohledu predikce časové ztráty u této kategorie cestujících nastává v případě, že se místo provozní komplikace nachází v obtížně přístupném terénu.

Druhou kategorii tvoří cestující, čekající na daný vlakový spoj v místech jeho pravidelného zastavení v úseku od místa vzniku mimořádné události do cílové stanice vlakového spoje.

Třetí kategorii tvoří ostatní cestující, kteří jsou nastalou mimořádnou událostí ovlivněni (např. cestující návazných spojů). Jedná se o cestující v návazných spojkách obsluhující přestupní uzly nebo o cestující jedoucích v protisměrných vlacích na úseku vzniku mimořádné události, ale také o cestující jedoucí v následných vlacích po úseku, ve kterém vznikla mimořádná událost do doby obnovení provozu na daném úseku.

Cestujícím zařazeným do první a druhé kategorie vznikají tzv. primární časové ztráty, cestujícím zařazeným do třetí kategorie vznikají tzv. sekundární časové ztráty. Aby bylo možno kvantifikovat tyto časové ztráty alespoň v částečné míře, musely by informace o počtech dotčených cestujících (zejména u třetí kategorie) být k dispozici pro potřeby optimalizační metody, což nebývá k dispozici.

Základním předpokladem kvantifikace časové ztráty vzniklé v důsledku provozní komplikace je tedy doba potřebná k odstranění následků provozní komplikace (okamžik obnovení běžného provozu).

Predikovat dobu potřebnou k odstranění následků mimořádné události je velice obtížné i pro zkušeného řídicího pracovníka. Každá mimořádná událost má svým způsobem individuální charakter z hlediska doby potřebné k odstranění jejích následků a tedy i výše odvozených časových ztrát. Výše vzniklých časových ztrát závisí na následujících faktorech:

- místo vzniku provozní komplikace (železniční stanice vs. místo na trati se zhoršenou dostupností),
- typ provozní komplikace (viz výše uvedená kategorizace MU),
- rozsah provozní komplikace (úroveň poškození kolejového vozidla, úroveň poškození infrastruktury, v případě střetu kolejového vozidla s překážkou na trati jde o míru ovlivnění dalšího provozu danou překážkou apod.),
- období vzniku provozní komplikace (léto – zima),
- dostupnost kapacit autobusových dopravců (místo volných kapacit, denní doba, kdy budou kapacity dostupné, velikost disponibilní kapacity) zajišťujících náhradní autobusovou dopravu za odřeknuté vlakové spoje.

Kromě časových ztrát vzniklých při jízdě na trati dotčené mimořádnou událostí vznikají časové ztráty cestujících i při přestupech na návazné spoje v přestupních uzlech sítě. Přestupní uzly z hlediska schopnosti dopravce ovlivnit výši časových ztrát u přestupujících cestujících se dělí do dvou skupin. První skupinu tvoří přestupní uzly, ve kterých se uskutečňují přestupy cestujících mezi vlaky téhož dopravce. Druhou skupinu tvoří přestupní uzly, ve kterých se uskutečňují přestupy cestujících mezi vlaky různých dopravců.

V rámci první skupiny přestupních uzlů si pracovník zajišťující operativní řízení rozhodne o vzniku přestupních vazeb a tím i o výši vzniklé časové ztráty individuálně na základě zkušeností a aktuální provozní situace. Ovšem ne vždy toto rozhodnutí provádí pouze jeden pracovník, může se stát, že v případě různých kategorií vlakových spojů s plánovanou přestupní vazbou dojde k dohodě dvou pracovníků zajišťujících operativní řízení v rámci jednoho dopravce.

V rámci druhé skupiny přestupních uzlů je nucen pracovník zajišťující operativní řízení jednoho dopravce kontaktovat pracovníka zajišťující operativní řízení na odpovídající úrovni u dopravce druhého. V takovém případě je nutno zohledňovat smlouvy uzavřené mezi dopravci, které obsahují ustanovení o čekacích dobách v přestupních uzlech.

Mohou nastat dvě situace. Pokud se příjezd zpožděného vlakového spoje uskuteční do stanovené doby čekání návazného vlaku, není třeba přijímat žádná další opatření a plánovaná časová ztráta se zvýší o dobu, které je vymezena časem pravidelného odjezdu návazného vlakového spoje a časem skutečného odjezdu návazného vlakového spoje v rámci dané čekací doby. To platí v obou směrech přestupů. Pokud je předpokládaný čas příjezdu vyšší než stanovená čekací doba návazného vlakového spoje, proběhne komunikace mezi pověřenými řídicími pracovníky (na úrovni dispečerského aparátu) o možnostech prodloužení čekacích dob. Pokud nenastane souhlas s prodloužením čekací doby týkající se návazného vlakového spoje, časová ztráta se zvýší o dobu, která uplyne do skutečného času odjezdu následujícího návazného vlakového spoje.

Dalším klíčovým úkolem pracovníka zajišťujícího operativní řízení v případě vzniku provozní komplikace je zajištění náhradní autobusové dopravy. Dopravce má zpravidla smluvně sjednaného autobusového dopravce, který náhradní dopravu zajišťuje. Rozsah objednávané náhradní autobusové dopravy závisí na frekvenci cestujících vyskytujících se na nahrazovaných vlakových spojích. V případě, že by z důvodu nedostatečných autobusových kapacit nedošlo k nasazení dostatečného počtu autobusů, bude opět docházet k navyšování časových ztrát, a to z důvodu opakovaných jízd téhož autobusu pro odvoz druhé a případně dalších skupin cestujících. Je nutné si uvědomit, že náhradní autobusová doprava využívá k jízdě pozemní komunikace, jejichž trasování často nekopíruje železniční trať, a dále, že jejich jízda může být ovlivněna úsekovou výkonností pozemní komunikace a hustotou okolního silničního provozu. Oba tyto nezanedbatelné fakty mohou být jednou z dalších příčin navyšování časových ztrát cestujících. Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím výši časové ztráty je lokalizace míst zastavení náhradní autobusové dopravy, protože ne vždy jsou místa zastavení náhradní autobusové dopravy totožná s místy zastavení vlakových spojů. Může tedy docházet k situacím, kdy některá méně frekventovaná místa zastavení vlakových spojů nebudou náhradní autobusovou dopravou obsluhována, tím ovšem může dojít k neuspokojení přepravní poptávky.

Pro dokreslení následků provozních komplikací je nutno uvést, že kromě ztrát časových existují pro dopravce také ztráty finanční. Finanční ztráty vznikají dopravci tehdy, když musí vynaložit určité náklady na odstranění následků mimořádné události, např. oprava kolejového vozidla.

Potom ale ještě existuje další typ finanční ztráty, který se projevuje prostřednictvím penále účtovaného dopravci objednavatelem veřejné hromadné dopravy (zpravidla krajským úřadem). Provozní komplikace se z pohledu penalizace dělí do dvou skupin. První skupinou jsou provozní komplikace, které mají za následek vznik penále. Jsou to provozní komplikace, způsobené chybnou činností dopravce například částečným nebo úplným nesplněním určitých provozních povinností. Do této skupiny lze zařadit provozní komplikace typu poruch kolejových vozidel. Druhá skupina je tvořena provozními komplikacemi, které nemají za následek vznik penále. Do této skupiny patří provozní komplikace, jejichž vznik nemohl dopravce ani při nejlepším plnění povinností předcházet. Jsou jimi například střet kolejového vozidla se silničním vozidlem na přejezdu, střet s osobou, střet s překážkou na trati, porucha zabezpečovacího zařízení a další.

Z výše uvedeného výčtu faktorů ovlivňujících provoz na železnici v případě vzniku provozní komplikace je patrné, že postup řešení provozní komplikace je znám, ale časový průběh řešení provozní komplikace je obtížně predikovatelný a tedy velikost časové ztráty je obtížně kvantifikovatelná (tedy i obtížně započitatelná do hodnoty optimalizačního kritéria). To se však týká především prvního dílčího období následujícího bezprostředně po vzniku provozní komplikace a určeného k likvidaci neodkladných následků provozní komplikace. Na toto dílčí období však navazuje druhé dílčí období, ve kterém je provoz relativně stabilizován v náhradním režimu. To sice znamená, že u dopravce, u kterého provozní komplikace vznikla, je již sice známa náhradní organizace oběhů souprav kolejových vozidel a organizace náhradní autobusové dopravy v úseku postiženém provozní komplikací dlouhodobějšího charakteru, což evokuje možnost využití modelu navrženého v Kapitole 5. nicméně, i v tomto případě je obtížné kvantifikovat časovou ztrátu při přestupech. I při organizaci náhradní autobusové dopravy mohou vznikat neočekávané komplikace provázené nárůstem zpoždění a tedy i časové ztráty a také platí, že není možno predikovat velikost časových ztrát při přestupech, protože tato velikost ztráty je ovlivněna také provozem na přípojných tratích a skutečnou časovou polohou návazných spojů.

Na základě výše popsaných skutečností je tedy možno konstatovat, že využitelnost modelu v případech provozních komplikací se vztahuje pouze ke druhému dílčímu období, nicméně i zde je jeho využitelnost omezená.

## 9 Shrnutí přínosů disertační práce pro rozvoj vědního oboru

V práci je rozvíjena obecná problematika synchronizace určité třídy technologických procesů probíhajících na specifické infrastruktuře typu síť.

Podmínky panující na sítích mohou být různorodé, při vytváření optimalizačních modelů je tedy nutno vždy přihlížet k určitým specifickým rysům, které se v konkrétní síti vyskytují a dbát konkrétních zásad, podle kterých se technologické procesy na sítích organizují.

Síť, na které technologické procesy splňující níže uvedené rysy probíhají, je tvořena předem definovanou množinou uzlů (vrcholů) a úseků (hran). Takto koncipovaná síť dále vykazuje znaky neorientovanosti a hranové ohodnocenosti.

Stávající spektrum optimalizačních přístupů je modelem uvedeným v disertační práci rozšířeno o nový přístup, který je možno charakterizovat jako přístup vhodný pro synchronizaci technologických procesů vykazujících znaky:

- síťovosti (synchronizace technologických procesů probíhá ve více místech současně),
- vícedrojevosti (technologické procesy mohou začínat v různých uzlech řešené sítě),
- diskrétnosti (technologické procesy se neuskutečňují spojitě v čas),
- periodičnosti (technologické procesy se opakují v předem definovaných pravidelných intervalech),
- vícefázovosti (technologické procesy jsou v předem definovaných místech sítě přerušovány z důvodu nutnosti splnit určité technologické úkony uskutečňované v jejich průběhu).

Optimalizační přístup použitý v předložené disertační práci je založen na exaktních metodách, konkrétně se jedná o smíšené celočíselné lineární programování, které za určitých podmínek (dostatek výpočetního času, velikost operační paměti použitého hardware) umožňuje dosáhnout optimálního řešení i při větším rozsahu matematického modelu (vyjádřeno počtem podmínek a počtem neceločíselných nezáporných proměnných).

Výsledky dosažené v disertační práci je možno uplatnit i v případech, kdy ve výše charakterizované neorientované síti bude hranám (všem nebo pouze vybranému počtu) přidělena orientace, navržený model je tedy po úpravách spočívajících v odstranění některých podmínek aplikovatelný, kromě sítí neorientovaných, také pro síť orientované a smíšené.

## 10 Shrnutí přínosů disertační práce pro praxi

Přínosy pro reálnou provozní praxi mohou být různorodé a odvíjející se od konkrétního oboru, pro který budou výsledky disertační práce využity. V dalším textu proto bude pozornost soustředěna zejména na uplatnění navržených modelů v podmínkách železniční dopravy, které byla v Kapitole 6 věnována experimentální část disertační práce.

V současné době v České republice jsou na železniční infrastruktuře nastaveny kompetence z hlediska organizace a řízení provozu tak, že časový harmonogram (plán) jízd vlaků nazývaný v podmínkách železniční dopravy také grafikon vlakové dopravy nebo ještě jinak jízdní řád, vytváří správce příslušné infrastruktury (řečeno terminologií zákona o drahách provozovatel dráhy).

Největším provozovatelem dráhy v České republice je státní organizace Správa železnic. Pokud je autorovi známo, tak Správa železnic, státní organizace, v současné době nevyužívá žádné optimalizační nástroje, které by umožňovaly konstrukci časového harmonogramu (plánu) jízd vlaků s přihlédnutím na požadavky týkající se vzájemné koordinace mezi spoji v přestupních uzlech. Časový harmonogram jízdy vlaků a vytváření přestupních vazeb je sice vytvářen na základě požadavků dopravců, ale rozhodování o finálním nastavení časových poloh jednotlivých vlakových spojů je plně v kompetenci konstruktéra jízdního řádu, který se sice při tomto rozhodování musí řídit určitými zásadami, ale jedná se však pouze o zásady, které byly v minulosti nastaveny buď intuitivně na základě historických dohod nebo zkušeností, nebo expertními odhady. Protože každý konstruktér jízdního řádu disponuje při tvorbě tohoto časového harmonogramu jiným zkušenostmi, může se kvalita jednotlivých vytvořených výsledných plánů na jednotlivých tratích lišit.

V této situaci vstupuje k řešení v práci navržený smíšený celočíselný lineární matematický model, který časové polohy naplánované v časovém harmonogramu – jízdním řádu vyhodnocuje objektivně z pohledu nastavení přestupních vazeb s ohledem na specifika železniční sítě tak, aby celková efektivita (měřená celkovou hodnotou čekání cestujících na přípojně spoje v přestupních uzlech) byla co nejvyšší (z pohledu celkové časové ztráty byla minimální). Jediný vstup ze strany konstruktéra jízdního řádu se omezuje na to, že musí před zahájením řešení modelu identifikovat místa vzniku požadovaných přestupních vazeb a definovat jejich váhy (vyjádřené např. průměrnými počty přestupujících cestujících mezi jednotlivými dvojicemi spojů).

V případě tvorby časového harmonogramu jízdy vlaků pomocí navrženého modelu je využito algoritmů, které zaručují nalezení optimálního řešení na základě zvolených kritérií (např. metoda větví a mezí nebo simplexová metoda).

Je reálné, že na základě popsaného lineárního matematického modelu se podaří generovat pravidelně časové harmonogramy jízdy vlaků a přestupních vazeb, které budou kvalitnější než současné plány tvořené konstruktéry jízdních řádů. Aplikace těchto harmonogramů do praxe umožní optimálně vytvářet přípojné vazby v rámci jednotlivých přestupních uzlů, což může mít za následek zvýšení jejich konkurenceschopnosti vůči ostatním druhům dopravy z pohledu zkrácení doby přepravy a tedy zvýšení tzv. cestovní rychlosti.

Pokud by se správci železniční infrastruktury podařilo zabezpečit automatické propojení zdrojů vstupních dat optimalizační výpočet a relevantně matematicky popsat specifické podmínky tratí a železničních stanic, pro které je časový harmonogram tvořen, umožnil by navržený optimalizační přístup významným způsobem omezit manuální práci konstruktéra při tvorbě časového harmonogramu jízdy vlaků a zabezpečení přestupních vazeb, automatizovat a urychlit tvorbu těchto harmonogramů. Zároveň by byla odstraněna případná chybovost konstruktéra v případě, že by časový harmonogram vytvářel manuálně.



## 11 Možnosti pokračování v řešení dané problematiky

Předložená disertační práce v obecné rovině popisuje postup optimalizace časových poloh transportních procesů na sítích. Rozsáhlost řešeného tématu, bohužel, neumožňuje v obecné poloze zohlednit všechny faktory s přímým vlivem na procesu tvorby jakéhokoliv časového harmonogramu. Proto by se další výzkum v řešené problematice měl vyvíjet např. následujícími směry.

### 1) Doplnění dosažených poznatků o poznatky týkající se jiných typů transportních sítí.

Typ transportní sítě může mít zásadní vliv na tvorbu časového harmonogramu transportních procesů na ní probíhajících a taktéž zásadní vliv na tvar matematického modelu a to jak v účelové funkci, tak i v soustavě omezujících podmínek. Např. je nutno zohlednit jiná uspořádání transportních sítí (počty transportních tras, specifika tvorby vazeb v koordinačních uzlech apod.).

### 2) Časová analýza průběhu transportních procesů.

Včasnost transportních procesů má přímý vliv na plnění časového harmonogramu a dodržení časových ztrát. V případě, že bude docházet k pravidelnému opožďování některých transportních procesů, bude taktéž docházet k opožďování návazných transportních procesů, což může mít vliv na další technologické aspekty provozu (např. v železniční dopravě změně pravidelného místa křižování vlakových spojů na jednokolejných tratích), rozpadu přípojných vazeb v koordinačních uzlech a vzniku dalších časových ztrát. Na základě výše uvedeného je vhodné rozvíjet problematiku objektivní analýzy provozních podkladů za účelem správného stanovení hodnot vstupních veličin.

### 3) Počty a směrovost přepravovaných elementů.

Intenzity a směrovosti přepravovaných elementů mají zásadní vliv na tvorbu přestupních vazeb. V Kapitole 6 jsou data o intenzitách (váhách) přestupních vazeb nastavena na jednotných modelových hodnotách, tzn., že všechny přestupní vazby mají stejné váhy. To však v praxi zpravidla neplatí.

#### 4) Adaptace modelu pro podmínky operativního řízení.

Potenciál rozvoje (i když omezeného) dané problematiky spočívá také v oblasti operativního řízení. Aby bylo možno systém pro podporu rozhodování v podmínkách operativního řízení rozvíjet, je nutno zajistit automatizovaný sběr a zpracování dat o aktuálních provozních podmínkách. V případech operativního řízení by nebylo nutné trvat na výpočtu optimálního řešení, ale mohlo by postačovat nalezení kvalitního a provozně přijatelného řešení za použití heuristických metod, které prokazují vysokou efektivitu při potřebě rychle vyřešit praktickou úlohu. Opakovaně je však třeba upozornit na fakt, že ani pro potřebu heuristické metody nemusí být některá důležitá data dostupná a jejich zjištění může (bez propojenosti informačních systémů různých dopravců) výhody použití heuristické metody eliminovat.

## 12 Závěr

Disertační práce se zabývá synchronizací vícedrokových procesů na sítích za účelem zvýšení jejich plynulosti v místech, ve kterých dochází k přerušení transportního procesu a přechodu přepravovaných elementů na jinou transportní trasu.

Zvyšování plynulosti probíhá prostřednictvím minimalizace časových ztrát v místech přechodů na jiné transportní trasy.

Úvodní kapitoly práce se zabývají motivací k řešení problému, obecnému vymezení procesů, které budou předmětem synchronizace analýzy současného stavu poznání v řešení dané problematiky. Největší počet poznatků byl publikován v literatuře věnované koordinačním problémům v dopravních systémech. Na základě prostudování literatury uvedené v Kapitole 3 byly v Kapitole 4 formulovány cíle disertační práce.

Stěžejními kapitolami předložené disertační práce jsou Kapitoly 5 – 8.

Kapitola 5 obsahuje návrh lineárního matematického modelu pro síťovou koordinaci vícedrokových procesů. Navržený matematický model zohledňuje nejkomplikovanější provozní podmínky panující na infrastruktuře, protože protisměrné transportní procesy mohou po téže transportní trase probíhat obousměrně, přičemž ve stejném místě transportní trasy se současně nesmí nacházet více než jeden technický prostředek, pomocí kterého je transportní proces uskutečňován.

V Kapitole 6 je, za účelem ověření funkčnosti, s navrženým lineárním matematickým modelem experimentováno v tom smyslu, že je aplikován na reálnou transportní síť, která odpovídá vybrané části železniční sítě Jihočeského kraje. Výsledky výpočetního experimentu potvrzují nejen funkčnost matematického modelu, ale také možnost jeho praktické implementace v reálných podmínkách. Výsledky aplikovaného matematického modelu umožnily snížit hodnotu celkové časové ztráty přestupujících cestujících o 744 minut.

Kapitola 7 obsahuje zhodnocení dosažených výsledků a diskuse. Ve zhodnocení dosažených výsledků je vedena diskuse týkající se splnění cílů deklarovaných v Kapitole 4. Podle názoru autora práce byly všechny tři deklarované hlavní cíle naplněny. Diskuse je potom věnování navazujícím krokům, které je nutno vykonat při implementaci výsledků výpočetního experimentu v praxi, tzn. v aktualizaci provozních plánů a dokumentů, které jsou v současnosti v platnosti u železničního dopravce GWTR.

V Kapitole 8 jsou dále diskutovány možnosti implementace navrženého modelu v podmínkách operativního řízení, tedy řízení v režimu on-line. Je ukázáno, že využití navrženého modelu při operativním řízení není jednoduché, neboť problematika kvantifikace časových ztrát naráží v současném stavu na nedostatek vstupních dat při vzniku provozní komplikace. Pokud by se podařilo odstranit problémy v opatrování vstupních dat, bylo by možno využít navržený model v tzv. druhém dílčím období, přičemž i zde by kvantifikace byla možná pouze při dodržení časových začátků plánovaných technologických procesů v místech, ve kterých dochází k přechodu přepravovaných elementů na transportní proces probíhající na jiné transportní trase.

Závěrečné kapitoly 9 – 11 obsahují názory autora práce na zhodnocení přínosů výsledků disertační práce pro rozvoj vědy, odbornou praxi a dále také na možnosti rozvoje řešené problematiky v navazujícím výzkumu.

Na základě předložené disertační práce je možné konstatovat, že vytyčené cíle byly dosaženy, byla vytvořena metodika řešené úlohy a ověřena na konkrétním příkladu z praxe a tak prokázána její použitelnost v praxi.

## 13 Summary of the benefits of the dissertation thesis for the development of the field of science

The thesis develops the general issue of synchronization of a certain class of technological processes taking place on a specific network infrastructure.

The conditions prevailing on the networks may divert, therefore the process of creating the optimization modeling models must focus on certain specific features that occur in a particular network, as well as an attention must be paid to specific principles according to organization of technological processes within specific networks.

The network on which technological processes meeting the following features take place consists of a predefined set of nodes (vertices) and sections (edges). The network conceived in this way also shows signs of non-orientation and edge evaluation.

The current spectrum of optimization approaches is extended by the model presented in the dissertation thesis by a new approach, which can be characterized as an approach suitable for the synchronization of technological processes exhibiting the following features:

- networking (synchronization of technological processes takes place in several places simultaneously),
- multi-resourced (technological processes can start in different nodes of the solved network),
- discretion (technological processes do not take place continuously within specified period of time),
- periodicity (technological processes are repeated at predefined regular intervals),
- multiphase (technological processes are interrupted in predefined places of the network due to the need to perform certain technological tasks performed during them).

The optimization approach the presented dissertation thesis focuses on is based on exact methods, namely mixed integer linear programming, which under certain conditions (sufficient computational time, size of operating memory used hardware) allows to achieve optimal solution even with a larger range of mathematical model (expressed by conditions and the number of non-integer non-negative variables).

The results achieved in the dissertation thesis can be applied in cases where the edges (all or only a selected number) are assigned within the non-oriented network as defined above, so the proposed model shall be understood applicable upon condition that the adjustments to remove some conditions are made. Such applicability of model is met in case of non-oriented networks and networks oriented and mixed either.

## 14 Summary of the benefits of the dissertation thesis for practice

The benefits for real operational practice may divert, thus respective benefits depend on the specific field within the results of the dissertation thesis are applied. Therefore, the following text is focused mainly on the application of the proposed models in the conditions of railway transport, which was devoted to the experimental part of the dissertation in Chapter 6.

At present, in the Czech Republic, competencies are set on the railway infrastructure in terms of organization and management of traffic. The time schedule (plan) of train journeys, also called the train schedule or otherwise the timetable in railway conditions, is created by the infrastructure manager.

The major infrastructure manager in the Czech Republic is the state organization Railway Administration. To the author's knowledge, the Railway Administration, a state organization, does not currently use any optimization tools that would allow the construction of a time schedule (schedule) of train journeys, taking into account the requirements for mutual coordination between connections at interchanges. The time schedule of train running and the creation of transfer links is created on the basis of the requirements of railway undertakings, but the decision on the final setting of time positions of individual train connections is fully in the competence of the timetable designer, who must follow certain principles in this decision. Principles that have been set in the past are intuitively based on historical agreements and experience, as well as on expert estimates. Concerning the fact that each timetable designer has different experience in creating respective timetable, the quality of the individual final timetables may vary from line to line.

In this situation, the solution proposes a mixed integer linear mathematical model, which evaluates the time positions planned in the time schedule - objectively from the point of view of setting transfer links with regard to the specifics of the railway network so that the overall efficiency (measured by the total value of passengers waiting for connections in interchanges) shall be as high as possible (total time loss is reduced). The only input from the timetable designer is limited to the fact that before starting to solve the model must identify the places of required interconnections and define their weights (e.g. expressed as an average number of transfer passengers between each pair of connections).

In the case of creating a time schedule of train running using the proposed model, applied algorithms shall guarantee the optimal solution based on selected criteria (e.g. method of branches and boundaries or simplex method).

Conclusions made so far may confirm that on the basis of the described linear mathematical model it is possible to regularly generate time schedules for train journeys and transfer links, which are of better quality than current plans created by timetable designers. The application of these schedules in practice lead to creation of optimized connections within individual interchanges, which may result in an increase in their competitiveness vis-à-vis other modes of transport in terms of shortening transport times and thus increasing the so-called cruising speed.

If the railway infrastructure manager ensures the automatic interconnection of input data sources optimization calculation and describes, in a mathematically relevant way, the specific conditions of lines and railway stations for which the time schedule is created, the proposed optimization approach will significantly reduce the manual work of the designer in creating the train schedule and securing transfer links due to the automating and accelerating the creation of these schedules. At the same time, a possible error rate of the designer would be eliminated, unless the designer creates the time schedule manually.



## 15 Possibilities of further solution of the given problem

In general, the presented dissertation thesis describes the process of optimizing the time positions of transport processes on networks. Unfortunately, the scope of the topic does not allow to focus on a general position of all the factors that may affect the process of creating arbitrary time schedule. Therefore, further research in this area should deal with, for example, the following topics.

- 1) Supplementing the acquired knowledge with knowledge concerning other types of transport networks.

The type of transport network can affect significantly the creation of a time schedule of transport as well as the shape of the mathematical model, both in the purpose function and in the system of limiting conditions. E.g. it is necessary to take into account other arrangements of transport networks (numbers of transport routes, specifics of creating links in coordination nodes, etc.);

- 2) Time analysis of the course of transport processes.

The timeliness of transport processes has a direct impact on meeting the time schedule and adhering to time losses. In the event of regular delays in some transport processes, there will also be delays in transport processes, which may affect other technological aspects of operation (e.g. in rail transport, change of the regular point of crossing train connections on single-track lines), breakdown of connections in coordination nodes and the occurrence of other time losses. Based on the above, it is appropriate to develop the issue of objective analysis of operational data in order to correctly determine the values of input variables;

- 3) Numbers and directionality of transported elements.

The intensities and directivity of the transported elements have a fundamental influence on the formation of transfer bonds. In Chapter 6, the data on the intensities (weights) of the transfer bonds are set to uniform model values, i.e. all transfer bonds have the same weights. However, this is generally not the case in practice;

#### 4) Adaptation of the model for the conditions of operational control.

The potential for development (albeit limited) of the issue also lies in the area of operational management. In order to be able to develop a decision support system in the conditions of operational management, it is necessary to ensure automated collection and processing of data on current operating conditions. In cases of operational management, it would not be necessary to insist on calculating the optimal solution, but it might be sufficient to find a quality and operationally acceptable solution using heuristic methods that demonstrate high efficiency in the need to quickly solve a practical task. However, it should be repeatedly pointed out that even for the needs of the heuristic method some important data may not be available and their detection may (without interconnection of information systems of different operators) eliminate the advantages of applying the heuristic method.

## 16 Conclusion of the Dissertation Thesis

The dissertation thesis deals with the synchronization of multi-source processes on networks in order to increase their fluidity in places where the transport process is interrupted and its transition to another transport route appears.

The fluidity increase is reached by minimizing time losses at the points of transitions to other transport routes.

The introductory chapters deal with the motivation to solve the problem, the general definition of the processes that shall be understood as the subject of synchronization analysis of the current state of knowledge regarding the respective topic. The largest number of findings have been published in the literature devoted to coordination problems in transport systems. Based on the study of the literature presented in Chapter 3, the objectives of the dissertation thesis are formulated in Chapter 4.

The main chapters of the submitted dissertation thesis are chapters 5 - 8.

Chapter 5 contains a project of a linear mathematical model for network coordination of multi-source processes. The proposed mathematical model takes into account the most complicated operating conditions prevailing on the infrastructure, i.e. opposite transport processes can take place in both directions on the same transport route, while at the same time there must not be more than one technical means by which the transport process is carried out.

In Chapter 6, in order to verify the functionality, the proposed linear mathematical model is experimented in the sense that it is applied to a real transport network that corresponds to a selected part of the railway network of the South Bohemian Region. The results of the computational experiment confirm not only the functionality of the mathematical model, but also the possibility of its practical implementation in real conditions. The results of the applied mathematical model made it possible to reduce the value of the total loss of time of transferring passengers by 744 minutes.

Chapter 7 contains an evaluation of the results achieved and a discussion. In the evaluation of the achieved results, there is a discussion concerning the fulfilment of the goals declared in Chapter 4. In the opinion of the author of the thesis, all three declared main goals shall be regarded fulfilled.

The discussion is then devoted to the follow-up steps that must be performed in the implementation of the results of the computational experiment in practice, i.e. in updating the operational plans and documents currently in force at the GWTR company.

Chapter 8 further discusses the possibilities of implementing the proposed model in terms of operational management, i.e. management in the online mode. It is shown that the use of the proposed model in operational management might be seen as a difficult, because the issue of quantification of time losses in the current state encounters a lack of input data in the event of operational complications. If the issues in providing input data could be eliminated, the proposed model could be used in the so-called second sub-period, and even quantification would be possible only by observing the time beginnings of planned technological processes in places where the transported elements transition to a transport process taking place on another transport route.

The final chapters 9 - 11 contain the opinions of the author on the evaluation of the benefits of the results of the dissertation thesis for the development of science, professional practice and also on the possibilities of developing the problem in subsequent research.

Based on the submitted dissertation thesis, it is possible to state that the set goals are achieved, the methodology of the problem has been created and verified on a specific example from practice and thus the proposed model demonstrated its applicability in practice.

## 17 Použitá literatura

1. Definice procesu dle EN ISO 9000:2000. 2020 [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: [https://zcu.arcao.com/kpv/pis/pinte/Definice\\_procesu\\_dle\\_EN\\_ISO\\_9000-2000.pdf](https://zcu.arcao.com/kpv/pis/pinte/Definice_procesu_dle_EN_ISO_9000-2000.pdf)
2. ČERNÁ, A.; ČERNÝ, J.: Manažerské rozhodování o dopravních systémech. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-849-7.
3. ČERNÝ, J.; KLUVÁNEK, P.: Základy matematickej teórie dopravy. Bratislava: Veda, 1991. ISBN 80-224-0099-8.
4. ČERNÁ, A.; ČERNÝ, J.: Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech. Pardubice: Institut Jana Pernera, 2004. ISBN 80-86530-15-9.
5. KRÁL, M.: Časová koordinace přípojné taktové dopravy v železniční stanici Ostrava-Svinov. Ostrava, 2008. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
6. OMELKA, V.: Návrh lokace přestupních terminálů v Karlovarském kraji. Ostrava, 2007. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
7. KROUŽIL, K.: Časová koordinace osobní železniční dopravy v přestupních stanicích na trati Ostrava-Svinov - Český Těšín. Ostrava, 2010. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
8. VILDOMCOVÁ, L.: Model časové koordinace leteckých spojů na tranzitních letištích. Ostrava, 2012. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
9. LORENZ, F.: Modely pro optimalizaci pravidelných jízdních řádů linek s uzavřeným oběhovým režimem a jednobodovou časovou koordinací. Ostrava, 2013. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
10. MARTINIK, J.: Časová koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku Opava. Ostrava, 2014. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
11. LAŠÁKOVÁ, K.: Optimalizace veřejné dopravy Rýmařovska. Ostrava, 2015. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
12. DUŠEK, V.: Časová koordinace spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou. Ostrava, 2017. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

13. CHYLA, R.: Časová koordinace spojů v přestupním uzlu Ostrava - Dubina. Ostrava, 2018. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
14. DORDA, M.: Časová koordinace spojů v síti MHD Frýdek-Místek. Ostrava, 2006. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
15. KOZEL, P.: Časová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy v úseku Frýdek-Místek - Dobrá. Ostrava, 2009. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
16. ROSEK, O.: Časová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy v úseku Šumperk - Velké Losiny. Ostrava, 2010. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
17. KOZEL, P.: Síťová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy. Ostrava, 2012. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
18. KUDLÁČ, Š., MAJERČÁK, J., MAŃKOWSKI, C.: The Proposal of Coordination the Rail and Bus Passenger Transport on the Relation Žilina – Ružomberok, Procedia Engineering. Volume 192, 2017, ISSN 1877-7058.
19. CHUNG, E.: Transfer Coordination Model and Real-time Strategy for Inter-modal Transit Services. Department of Civil Engineering University of Toronto. 2009.
20. CIAFFI, F., CIPRIANI, E., PETRELLI, M.: Feeder Bus Network Design Problem: a New Metaheuristic Procedure and Real Size Applications. Procedia - Social and Behavioral Sciences. Volume 54, 2012, ISSN 1877-0428.
21. SUN, Y., SUN, X., LI, B., GAO, D.: Joint Optimization of a Rail Transit Route and Bus Routes in a Transit Corridor. Procedia - Social and Behavioral Sciences. Volume 96, 2013, ISSN 1877-0428.
22. DAGANZO, C., ANDERSON, P.: Coordinating Transit Transfers in Real Time. University of California at Berkeley. 2016.
23. JIAQING, W., SONG, R., WANG, Y., CHEN, F., SHUBIN, L.: Modeling the Coordinated Operation between Bus Rapid Transit and Bus. Mathematical Problems in Engineering. 2015.

24. VIJAYAKUMAR, N., EL-GENEIDY, A.: Coordinating schedules of bus routes in a sharead service area. McGill University. 2011.
25. KUBIŠOVÁ, A.: Operační výzkum. Jihlava, 2014. Učební text. Vysoká škola polytechnická Jihlava, Katedra matematiky. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/dxuqz/P1\\_skripta.pdf](https://is.muni.cz/th/dxuqz/P1_skripta.pdf)
26. ŠMEREK, M., MOUČKA, J.: Ekonomicko - matematické metody. Brno: Univerzita obrany, Katedra ekonometrie, 2008. ISBN 978-80-7231-526-0.
27. ROHN, J.: Lineární programování [online]. Praha, 2002. ISBN nezjištěno. Dostupné z: <http://uivtx.cs.cas.cz/~rohn/publist/skripta.pdf>. Učební text. Univerzita Karlova.
28. Simplexový algoritmus, Web Wikipedie [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Simplexov%C3%BD\\_algoritmus](https://cs.wikipedia.org/wiki/Simplexov%C3%BD_algoritmus).
29. DEMEL, J.: Operační výzkum [online]. Praha, 2010 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <http://kix.fsv.cvut.cz/~demel/ped/ov/ov100920.pdf>. Učební text. České vysoké učení technické v Praze.
30. JANÁČEK, J.: JÁNOŠÍKOVÁ, Ľ.; BUZNA, Ľ.; KOHÁNI, M.: *Modelovanie a optimalizácia*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2013. ISBN 978-80-554-0815-6.
31. OLIVKOVÁ, I.: *Provoz a ekonomika dopravy* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: [https://issuu.com/michdor/docs/m16\\_text](https://issuu.com/michdor/docs/m16_text). Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
32. Technický popis zařízení JOP. AŽD Praha s.r.o. Web AŽD [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: [https://www.azd.cz/backend\\_bootstrap.php?netwings\\_query\\_key=/storage/get/203-](https://www.azd.cz/backend_bootstrap.php?netwings_query_key=/storage/get/203-).
33. Technický popis zařízení radioblok. AŽD Praha s.r.o. Web AŽD [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://www.azd.cz/admin-data/storage/get/208->.
34. Mapy pro širokou veřejnost. SPRÁVA ŽELEZNIC, státní organizace. Portál provozování dráhy [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <http://provoz.szdc.cz/PORTAL/ViewArticle.aspx?oid=594598>

35. Základní dopravní dokumentace, interní materiál. SPRÁVA ŽELEZNIC, státní organizace. Portál provozování dráhy [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/PORTAL/ViewArticle.aspx?oid=1638956>
36. Mapy stanic, interní materiál. SPRÁVA ŽELEZNIC, státní organizace. Portál provozování dráhy [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/PORTAL/ViewArticle.aspx?oid=1778495>
37. Popis a podmínky přístupu na železniční dopravní cestu, interní materiál. SPRÁVA ŽELEZNIC, státní organizace. Portál provozování dráhy [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/Portal/ViewArticle.aspx?oid=1777549>
38. Přípoje mezi vlaky osobní dopravy, interní materiál. SPRÁVA ŽELEZNIC, státní organizace. Portál provozování dráhy [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/Portal/ViewArticle.aspx?oid=1728713>.
39. Předpis SŽDC D17, interní materiál. SPRÁVA ŽELEZNIC, státní organizace. Portál provozování dráhy [online]. 2020 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/Portal/ViewDirective.aspx?oid=1168227>.



## 18 Seznam publikací vytvořených v rámci doktorského studia

### 18.1 Seznam publikací s přímým vztahem k tématu disertační práce

1. LORENZ, F., TEICHMANN, D., DORDA, M.: Periodic Timetable of Routes with Closed Scheduling Vehicles and Time Coordination in One Point Optimization Models. In: Proceedings of 31th International Conference Mathematical Methods in Economics 2013. September 11. – 13. Jihlava: College of Polytechnics Jihlava, 2013, s. 541 – 545. ISBN 978-80-87035-76-4.
2. LORENZ, F., TEICHMANN, D., FARANA, R.: Network synchronization of periodic multiple source flows. In: Proceedings of 16th International Carpathian Control Conference (ICCC 2015). May 27. – 30. Szilvásvárád, 2015, s. 300 – 303. ISBN 978-1-4799-7369-9.
3. LORENZ, F., DORDA, M.: Network synchronization of discrete transport processes using a simulation model. In: Proceedings of 5th Conference on Applied Mathematics APLIMAT 2016. February 2. – 4. Bratislava: Faculty of Mechanical Engineering, Bratislava, 2016, s. 755 – 761. ISBN 978-80-227-4531-4.
4. LORENZ, F., JANOS, V., TEICHMANN, D., DORDA, M.: Time coordination of the passenger train connections in a selected region of the Czech Republic. – probíhá recenzní řízení.
5. LORENZ, F., TEICHMANN, D.: Coordination of periodic multiple source transport processes in selected nodes of network. In: XXXIX. Seminar ASR '2015 “Instruments and Control”. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 2015. s. 55-59. ISBN 978-80-248-3744-4.

## 18.2 Seznam ostatních publikací

1. RUSEK, M., LORENZ, F.: Simulation model for regular operation of section. In: Proceedings of 15th International Carpathian Control Conference (ICCC 2014). May 28. – 30. Velké Karlovice, CZECH REPUBLIC 2014, s. 503 – 506. ISBN 978-1-4799-3527-7.
2. TEICHMANN, D., DORDA, M., FRIČ, J., LORENZ, F.: Optimal localization of investment means for increasing networks capacity in indeterminate financial conditions. In: Proceedings of 31st International Conference on Mathematical Methods in Economics. September. 11. – 13. Jihlava, CZECH REPUBLIC 2013, s. 933 – 938. ISBN 978-80-87035-76-4.

## Seznam tabulek

- 6.1 Jízdní doby pro trať České Budějovice – Nové Údolí.
- 6.2 Jízdní doby pro trať Číčenice – Nové Údolí.
- 6.3 Jízdní doby Strakonice – Volary.
- 6.4 Nejdříve možné časy příjezdů vlakových spojů do koordinačních uzlů České Budějovice, Číčenice a Strakonice – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $I_k^{CA}$ .
- 6.5 Nejdříve možné časy odjezdů vlakových spojů z koordinačního uzlu České Budějovice – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $J_{sk}$ .
- 6.6 Nejdříve možné časy odjezdů vlakových spojů z koordinačního uzlu Strakonice – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $J_{sk}$ .
- 6.7 Nejdříve možné časy odjezdů vlakových spojů z koordinačního uzlu Číčenice – vlakové spoje bez možnosti časového posunu, patřící do množiny  $J_{sk}$ .
- 6.8 Fragment incidenční matice vyjadřující nutnost křižování protisměrných vlakových spojů.
- 6.9 Dosažené výsledky matematického modelu.

## Seznam obrázků

- 3.1 Hierarchický vztah mezi autobusovými linkami a železniční linkou.
- 3.2 Postup generování kandidátů autobusových linek.
- 3.3 Algoritmus simplexové metody.
- 3.4 Pracovní prostředí softwaru Xpress – IVE s vyznačením jednotlivých částí pracovního prostředí.
- 6.1 Fotografie jednotného obslužného pracoviště v ŽST Volary, které slouží k dálkovému řízení tratě v úseku Volary – Nové Údolí.
- 6.2 Fotografie vestavěné části zařízení radioblok do hnacího vozidla řady 816.
- 6.3 Fotografie ovládací skříňky zařízení radioblok ve hnacím vozidle řady 816.
- 6.4 Řešená železniční síť.
- 6.5 Řešená železniční síť se znázorněním přestupních vazeb.
- 6.6 Schéma kolejíště železniční stanice Strakonice.
- 6.7 Schéma kolejíště železniční stanice Číčenice.
- 6.8 Schéma kolejíště železniční stanice České Budějovice osobní nádraží.
- 6.9 Schéma kolejíště železniční stanice Volary.
- 6.10 Schéma kolejíště železniční stanice Černý Kříž.
- 6.11 Fragment nákresného jízdního řádu vyjadřující nutnost křížování protisměrných vlakových spojů korespondující s incidenční maticí.
- 7.1 Graf časové náročnosti výpočtu optimálního řešení.
- 7.2 Graf průběhu konvergence k optimálnímu řešení v čase.
- 7.3 Stavové hlášení programu Xpress-IVE o nalezení optimálního řešení.

## Seznam příloh

Příloha č. 1 – Incidenční matice

# Příloha č. 1

## Incidenční matice

			194 - Odjezd z Českých Bud.						194 - Odjezd z Nového Údolí						197 - Odjezd z Čičenic						197 - Odjezd z Nového Údolí						198 - Odjezd ze Strakonice						198 - Odjezd z Volar										
	A	Čas Odjezdu [hh:mm]	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	7:30	9:30	11:30	13:30	15:30	17:30	19:30	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	8:30	10:30	12:30	14:30	16:30	18:30			
	Čas Odjezdu [hh:mm]	Pořadí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38			
194 - Odjezd z Českých Bud.	8:00	1	x	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10:00	2	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	12:00	3	0	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14:00	4	0	0	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	16:00	5	0	0	0	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	18:00	6	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
194 - Odjezd z Nového Údolí	9:00	7	1	1	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11:00	8	0	1	1	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	13:00	9	0	0	1	1	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15:00	10	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	17:00	11	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	19:00	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
197 - Odjezd z Čičenic	7:30	13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9:30	14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11:30	15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	13:30	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	15:30	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	17:30	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19:30	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
197 - Odjezd z Nového Údolí	6:00	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8:00	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10:00	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	12:00	23	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14:00	24	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	16:00	25	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18:00	26	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
198 - Odjezd ze Strakoni c	9:00	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
	11:00	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
	13:00	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
	15:00	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
	17:00	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
	19:00	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	1	0	0	0
198 - Odjezd z Volar	8:30	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	
	10:30	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	
	12:30	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	
	14:30	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	
	16:30	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	
	18:30	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0